

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

КУЗЬМИЧ ЛЮДМИЛА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 043.5

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ
СКЛАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИЛАДОВОЮ СИСТЕМОЮ**

05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: Заслужений метролог України,
доктор технічних наук, професор
КВАСНІКОВ Володимир Павлович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних
систем та технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
КОЛОМІЄЦЬ Леонід Володимирович,
Одеська державна академія технічного регулювання та
якості, ректор;
доктор технічних наук, професор
ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович,
Житомирський державний технологічний університет,
завідувач кафедри метрології та інформаційно-
виміральної техніки;
доктор технічних наук, професор
МОТІКО Федір Дмитрович
Національний технічний університет "Львівська
політехніка", професор кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Захист відбудеться "29" листопада 2019 р. о 14³⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.07 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корпус 1, ауд. 317.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий "29" жовтня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю. В. Киричук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні світові тенденції розвитку промисловості та прискорення науково – технічного прогресу висувають на передній план питання забезпечення технічного рівня, якості, надійності та ефективності роботи складних технічних конструкцій, які в процесі експлуатації піддаються широкому спектру режимів навантаження, впливу агресивних полів та середовищ і, як наслідок, можуть досягати різних граничних станів, що реалізуються за складною розгалуженою сценарною схемою. Тому ключовим питанням стає вибір методики і засобів контролю та вимірювання параметрів напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій, що дозволить робити завчасне прогнозування розвитку їхньої працездатності, критичних режимів, граничних станів тощо.

Багатоваріантність механізмів контролю та вимірювання параметрів напружено – деформованого стану конструкцій передбачає розвиток комплексних методів, сучасних засобів автоматичного контролю та вимірювання параметрів напружено – деформованого стану, використання яких дозволяє забезпечити з достатньо високою вірогідністю ідентифікацію небезпечних станів при різних режимах навантаження.

З урахуванням вищевикладеного, засоби моніторингу, автоматичного контролю та вимірювання напружено – деформованого стану покликані знизити рівень невизначеності щодо стану конструкцій, а також слугуватимуть за основу для прийняття обґрунтованих рішень про можливість їхньої подальшої експлуатації, необхідності проведення планово – попереджувальних ремонтів чи реконструкції в цілому.

Аналіз останніх досліджень показав, що найважливішу роль у забезпеченні якості і надійності складної технічної конструкції відіграє контрольовано-вимірювальна техніка, в якій особливе місце займають засоби вимірювання та контролю функціональних параметрів даних об'єктів. Питанням розробки інформаційно-вимірювальних систем, методів, засобів та алгоритмів вимірювання механічних величин, зокрема параметрів напружено – деформованого стану, програмно – математичного забезпечення вимірювальних систем, оптимізації процесів вимірювання присвячені роботи відомих як вітчизняних, так і зарубіжних вчених, зокрема Альтшулера Г.С., Буша Г.Я., Володарського Є.Т., Гапшиса А.А., Глушкова В.М., Ніксона Дж., Новікова О.М., Орнатського П.П., Осборна А., Сіроджа І.Б., Хілла П., Хубка В., Цвіклі В. Туза Ю.М., Liu M., Kazeroni M., та ін. Віддаючи належне здобуткам цих дослідників, зауважимо, що, незважаючи на значний обсяг публікацій з даної тематики, ними не охоплено усієї сукупності питань таких складних та багатовимірних процесів, якими є проблеми автоматизації процесів конструювання, зокрема приладових систем, тому необхідні подальші наукові дослідження, які б ґрунтувались на теоретичних та практичних надбаннях учених та практичних фахівців. У більшості праць увага приділяється, в основному, вимірювальним приладовим системам різних типів, що дозволяють отримувати інформацію про параметри об'єкта з точнісними характеристиками середнього класу, з застосуванням комп'ютерної корекції похибок, зберіганням

даних про процес та результати вимірювання. Однак вимоги до точності вимірювання дистанційними приладовими системами призводить до необхідності удосконалення методів та засобів вимірювання напружено – деформованого стану для отримання достовірних моделей отриманих показів з врахуванням умов експлуатації.

Тому на даному етапі гостро стає питання про створення інтелектуальних вимірювальних приладових систем, які містять, на відміну від класичних інформаційно-вимірювальних систем, базу даних, базу знань, вимірювальну систему з блоками незалежної перевірки та ін.

Таким чином, проблема точних вимірювань напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій постає стратегічно важливою і актуальною для України. Тому постає питання необхідності вдосконалення сенсорних приладових систем вимірювання напружено – деформованого стану, розробки нових і удосконалення існуючих методів і засобів вимірювання з покращеними метрологічними характеристиками.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національного авіаційного університету відповідно до Закону України № 3715-VI "Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні", зокрема, "Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки", а також відповідно до держбюджетної тематики Міністерства освіти і науки України в науково-дослідній роботі № 125-ДБ17 "Методологія побудови сучасних дистанційних інформаційно-вимірювальних систем" (номер держреєстрації 0117U002367), де автор була виконавцем (розділи 2.4, 3.2).

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методів і засобів дистанційного вимірювання напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій, що забезпечують підвищення точності та швидкодії, розширення функціональних можливостей та метрологічних характеристик шляхом розробки і застосування теоретичних основ і принципів побудови приладової системи для вимірювання напружено – деформованого стану на основі нового інтелектуального інтерфейсу.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання досліджень:

- дослідити та ідентифікувати параметри математичної моделі вимірювання напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій, проаналізувати сучасний стан розвитку методів і засобів їх вимірювання та провести класифікацію існуючих методів вимірювання напружено – деформованого стану;

- розробити теоретичні основи побудови приладової системи для вимірювання напружено – деформованого стану складних конструкцій, в тому числі принципів побудови вимірювальних систем, методів та математичних моделей цієї системи;

- удосконалити методологію розв’язання проблеми підвищення точності вимірювання параметрів напружено – деформованого стану приладовою системою з покращеними метрологічними характеристиками, а саме підвищенням точності вимірювання, швидкодії та завадозахищеності на основі статистичних даних.

- розвинути теоретичні засади методів та способів дистанційного вимірювання параметрів напружено – деформованого стану та проаналізувати способи підвищення їх метрологічних характеристик на базі розроблених математичних моделей метрологічних характеристик засобів вимірювання та методів оцінювання характеристик точності вимірювань параметрів напружено – деформованого стану;

- удосконалити відомі методики, процедури, схеми метрологічної атестації засобів вимірювання параметрів напружено – деформованого стану з урахуванням концепції невизначеності вимірювання;

- проаналізувати систематичні, невилучені систематичні та методичні складові похибок засобів вимірювання параметрів напружено – деформованого стану та проаналізувати складові похибки первинних мікропроцесорних перетворювачів, на основі чого розробити нові більш ефективні математичні моделі та методики для визначення похибок, а також спосіб корекції температурної похибки тензодатчика та інструментальної похибки;

- розробити інтелектуальний інтерфейс для дистанційних вимірювань напружено – деформованого стану за допомогою мультиплексора при дії дестабілізуючих факторів та резистивних тензодатчиків, що забезпечить підвищення точності вимірювань та завадозахищеності, а також розробити математичні моделі попередньої обробки інформаційних сигналів при дистанційних вимірюваннях напружено – деформованого стану;

- провести експериментальні дослідження розроблених засобів вимірювання для підтвердження адекватності розроблених теоретичних моделей, ефективності запропонованих методів та створених на цій основі комп’ютеризованої приладової системи вимірювання напруження та деформації.

Об’єктом дослідження є процес вимірювання напружень та деформацій за допомогою приладової системи, реалізованої на основі розроблених нових та удосконалених існуючих методів і засобів вимірювальної техніки.

Предметом дослідження є методи і засоби вимірювання напружено – деформованого стану шляхом формування та алгоритмічної обробки вимірювальної інформації.

Методи досліджень. Методологічною основою дисертаційної роботи є застосування є застосування системно - спрямованого підходу та синергетичної концепції дослідження процесів і станів складних конструкцій, аналізу проблеми підвищення їх експлуатаційної надійності. Методологія та методи дослідження ґрунтуються на застосуванні теоретичних положень теорії напружень та деформацій та експериментальних методів дослідження напружено – деформованого стану, метрології, теорії вимірювань, теорії надійності, теорії вірогідності та математичної статистики. Обробка результатів

теоретичних і експериментальних досліджень здійснювалася методами комп'ютерного моделювання та математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розв'язанні важливої науково – технічної проблеми, а саме розробки методів вимірювання напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій та побудови інтелектуальної приладової системи вимірювання напружено – деформованого стану підвищеної точності, завадозахищеності та швидкодії з підвищеними метрологічними характеристиками, які, на відміну від відомих, враховують характер взаємодії датчика з об'єктом вимірювання, що реалізовано в отриманні автором особисто наступних наукових результатів:

1. Вперше запропонована нова технологія побудови приладів для вимірювання механічних величин роботи з інтелектуальними датчиками на базі TEDS, яка дає змогу підвищити метрологічні характеристики приладової системи в порівнянні з існуючими та розроблено метод оцінювання динамічних невизначеностей, який полягає у визначенні амплітудного значення динамічної невизначеності на основі сукупності амплітудо – частотної та фазо– частотної характеристики розробленого засобу вимірювання напруження та спектральної щільності сигналу, що дає змогу підвищити точність вимірювання.

2. Вперше розроблено метод автоматичної безрозривної корекції систематичної складової похибки дистанційного вимірювання напружено – деформованого стану на базі аналогових інтерфейсів для тензодатчиків, який, на відміну від існуючих, дозволяє більш ефективно коригувати похибки вимірювального каналу та розроблено метод корекції інструментальної випадкової похибки, зумовленої не ідеальністю активних компонентів, опору ліній зв'язку та аналогових комутаторів при дистанційному вимірюванні тензодатчиком на основі математичних моделей метрологічних характеристик, які являють собою низькочастотні корельовані шуми.

3. Дістали подальший розвиток теоретичні основи аналізу приладової системи на основі системного підходу та синтезу вимірювальної інформації про напружено – деформований стан складних конструкцій, що дають можливість визначити коригуючі параметри при використанні поліноміальних залежностей від п'ятого до дев'ятого порядку.

4. Дістали подальший розвиток теоретичні основи розробки приладових систем для вимірювання напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій, у тому числі удосконалено математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено – деформованого стану та розроблено методику вимірювання деформацій та напружень з урахуванням структури сенсорного елемента датчика та температурного коефіцієнту опору тензорезисторів, що дає змогу здійснити ефективну лінеаризацію та корекцію, та забезпечує підвищення точності вимірювання деформацій та напружень.

5. Удосконалено математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій та розроблено методику вимірювання деформацій та напружень з урахуванням структури сенсорного елемента датчика та температурного коефіцієнту опору тензорезисторів, що дає змогу здійснити ефективну лінеаризацію та корекцію,

та забезпечує підвищення точності вимірювання деформацій та напружень.

6. Удосконалено модель аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань сигналів тензодатчиків з автоматичною корекцією похибки під впливом різноманітних дестабілізуючих факторів, зорієнтований на дистанційне вимірювання параметрів напружено – деформованого стану за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків з підвищеними метрологічними та техніко – економічними характеристиками, структура яких включає вимірювальний підсилювач з диференційно- струмовими входами, що забезпечує підвищення коефіцієнту послаблення синфазних завад.

7. Набув подальшого розвитку метод і удосконалені засоби захисту вимірювального каналу параметрів напружено – деформованого стану від завад нормального виду, у тому числі за умови не лінійності функції перетворення аналогового інтерфейсу, котрий, на відміну від існуючих методів, забезпечує підвищення точності вимірювань та покращення завадо захищеності аналогового інтерфейсу в умовах апроксимації нелінійних функцій перетворення вимірювальних сигналів.

8. Удосконалено математичну модель на базі вимірювального підсилювача з диференціально – струмовими входами для роботи з одноелементним тензодатчиком, де один із подільників утворений резистивним тензодатчиком, а сам вимірювальний підсилювач включає операційний підсилювач першого каскаду, виконаний за схемою інвертора струму, що дає можливість зменшити інструментальні похибки, зумовлені не ідеальністю операційних підсилювачів, ліній зв'язку та аналогових комутаторів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому що:

1. На основі аналізу напружено – деформованих і граничних станів складних технічних конструкцій, комплексного аналізу динаміки навантаження та напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій запропоновано систему оцінювання ресурсу складних конструкцій.

2. Використання аналізу надійності та синтезу вимірювальної інформації про напружено – деформований стан складних конструкцій у практиці проектування складних конструкцій для вибору оптимального варіанту конструкції приладу, прогнозування граничного напружено – деформованого стану та відмов приладової системи.

3. Розроблено приладову систему вимірювань параметрів напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій, що забезпечує високу точність та швидкодію дистанційних вимірювань механічних величин.

4. Доведено ефективність розробленого методу вимірювання параметрів напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій з урахуванням нового інформативного параметру, а саме корекції складової інструментальної похибки і визначено точність результатів вимірювань параметрів напружено – деформованого стану шляхом чисельного моделювання на ПК та експериментальних досліджень.

5. Доцільність побудови приладової системи вимірювань параметрів напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій з

покращеними метрологічними характеристиками, а саме зменшено похибку вимірювання на 17%.

6. Розроблено методику оптимізації аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних датчиків, яка дозволяє більш ґрунтовно підійти до питань врахування похибок аналогових інтерфейсів при вимірюванні напружено – деформованого стану. Такий підхід дозволяє більш точно врахувати всі складові похибки аналогового інтерфейсу.

7. Розроблено нову класифікацію методів вимірювання напружено – деформованого стану та класифікацію факторів, що впливають на вимірювання напружено – деформованого стану корпусу літака.

8. Розроблено алгоритми і процедури оцінювання характеристик точності вимірювання параметрів напружено – деформованого стану.

Впровадження результатів роботи. Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено на підприємствах: Державне підприємство «Завод 410 цивільної авіації», Публічне акціонерне товариство «Науково–виробниче об'єднання «Київський завод автоматики», приватне підприємство «Фірма Валеан і К» (м.Рівне) та у навчальний процес в Національному авіаційному університеті при викладанні дисциплін «Фізичні основи сучасної метрології», «Основи метрології та електричних вимірювань» за спеціальністю Інформаційні вимірювальні системи».

Наукову новизну та практичне значення результатів роботи підтверджено патентом України №134572.

Особистий внесок здобувача. Основний зміст дисертаційної роботи та її результати відображені в опублікованих працях автора. Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в роботі використані ті результати, що є результатом особистої праці здобувача. Достовірність та обґрунтованість результатів дисертаційної роботи підтверджено збіжністю аналітичних розрахунків, експериментально та моделюванням на ПК.

Апробація результатів дисертації. Викладені у дисертаційній роботі результати досліджень доповідалися, обговорювалися та одержали схвалення на таких міжнародних наукових конференціях і семінарах: міжнародна науково-практична конференція «Социально –экономические и экологические проблемы сельского и водного хозяйства» (м. Москва, 2010); міжнародна науково – практична конференція молодих науковців, аспірантів та студентів «Інформаційно – обчислювальні технології, автоматика та електротехніка (ІТАЕ – 2016)»(м. Рівне, 2016); 10^а, 11^а міжнародна науково-практична конференція "Метрологія та вимірювальна техніка" (м. Харків 2016 р., 2018 р.); VII, VIII всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» (м. Київ 2016 р., 2018 р.); 3^а, 4^а міжнародна науково-технічна Internet-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (м. Київ 2016 р., 2017 р.); науково-практична конференція "Удосконалення та модернізація озброєння, військової та спеціальної техніки, що знаходиться на озброєнні

Збройних Сил України, шляхом впровадження технічних рішень, що охороняються патентами України на винахід та корисну модель" (м. Київ 2017 р.); 9^а, 10^а, 11^а міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (м. Київ 2016 р., 2017 р., 2018 р.); 4^а міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017)» (м. Вінниця 2017 р.); 7^а, 8^а 9^а міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів 2017 р., 2018 р. 2019 р.); 13^а, 14^а міжнародна науково-технічна конференція "Авіа-2017" (м. Київ 2017 р., 2019 р.); міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми математичного моделювання, обчислювальних методів та інформаційних технологій» (м. Рівне 2018 р.); VI международная научно-техническая Интернет-конференция «Информационные технологии в образовании, науке и производстве» (м. Мінськ 2019 р.); 12^а міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки» (м. Київ 2019 р.); 14^а міжнародна науково-практична конференція «Математичне та імітаційне моделювання систем (МОДС 2019)» (м. Чернігів 2019 р.).

Також результати дисертаційної роботи доповідались на всеукраїнських наукових конференціях, а також на семінарах кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національного авіаційного університету.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 56 наукових праць, у тому числі 1 монографія, 27 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у виданнях іноземних держав, 24 – у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 3 статті у інших виданнях України, 1 патент на корисну модель, 24 – тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і 6 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 334 сторінки. Основний зміст викладено на 311 сторінках, який містить 46 рисунків, 10 таблиць. Список використаних джерел становить 235 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі відзначено актуальність теми дисертаційної роботи, напрямок, мету і задачі дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами. Викладено основні положення, які виносяться на захист, визначається наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, відомості про апробацію та публікацію основних результатів дисертаційної роботи, її обсяг і структуру, визначено особистий внесок здобувача та наведено інформацію щодо впровадження результатів роботи.

Перший розділ присвячено аналізу сучасних підходів до розробки методів, методик та засобів вимірювальної техніки для вимірювання механічних величин, а саме; напруження, деформації, переміщення, сили, тиску тощо. Встановлено, що розвиток наукових принципів та методології

забезпечення якості складних конструкцій здійснюється на основі визначення та прогнозування їхньої надійності через ідентифікацію їхнього фактичного стану у тому числі завдяки відомостям про напружено–деформований стан.

В процесі експлуатації складні конструкції піддаються безперервним дестабілізуючим факторам та впливам (рис.1), що призводять до виникнення та накопичення в елементах конструкцій пошкоджень та відмов. Встановлено, що найбільш складними та найменш дослідженими є механічні впливи, які значною мірою впливають на напружено–деформований стан конструкції, а відповідно, на граничний стан, залишковий ресурс тощо.



Рисунок 1 – Класифікація дестабілізуючих факторів та впливів на надійність складних технічних конструкцій

На сьогоднішній день є відомими і в достатній мірі описаними різні методи вимірювання параметрів напружено – деформованого стану, однак, станом на сьогодні відсутній їх комплексний огляд та аналіз з висвітленням переваг та недоліків. Тому було здійснено комплексний аналіз існуючих методів та засобів вимірювання напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій, проблем метрологічного забезпечення вимірювань напруженого та деформованого стану, огляду теоретичних основ побудови методів і засобів вимірювання параметрів напружено – деформованого стану, визначенню основних завдань та напрямків подальших досліджень. При цьому класифіковано основні чинники, що впливають на напружено – деформований стан складних технічних конструкцій і призводять до зміни надійності та появи відмов. Автором запропоновано класифікацію методів вимірювання напружено – деформованого стану, що наведено на рис. 2, та здійснено детальний аналіз даних методів з виявленням позитивних та негативних ефектів. Встановлено, що в сучасних умовах експлуатації складних технічних конструкцій при

вимірюванні напружено – деформованого стану найбільш оптимальним є тензометричний метод вимірювання за допомогою резистивних тензодатчиків та волоконно - оптичних тензодатчиків типу FBG.

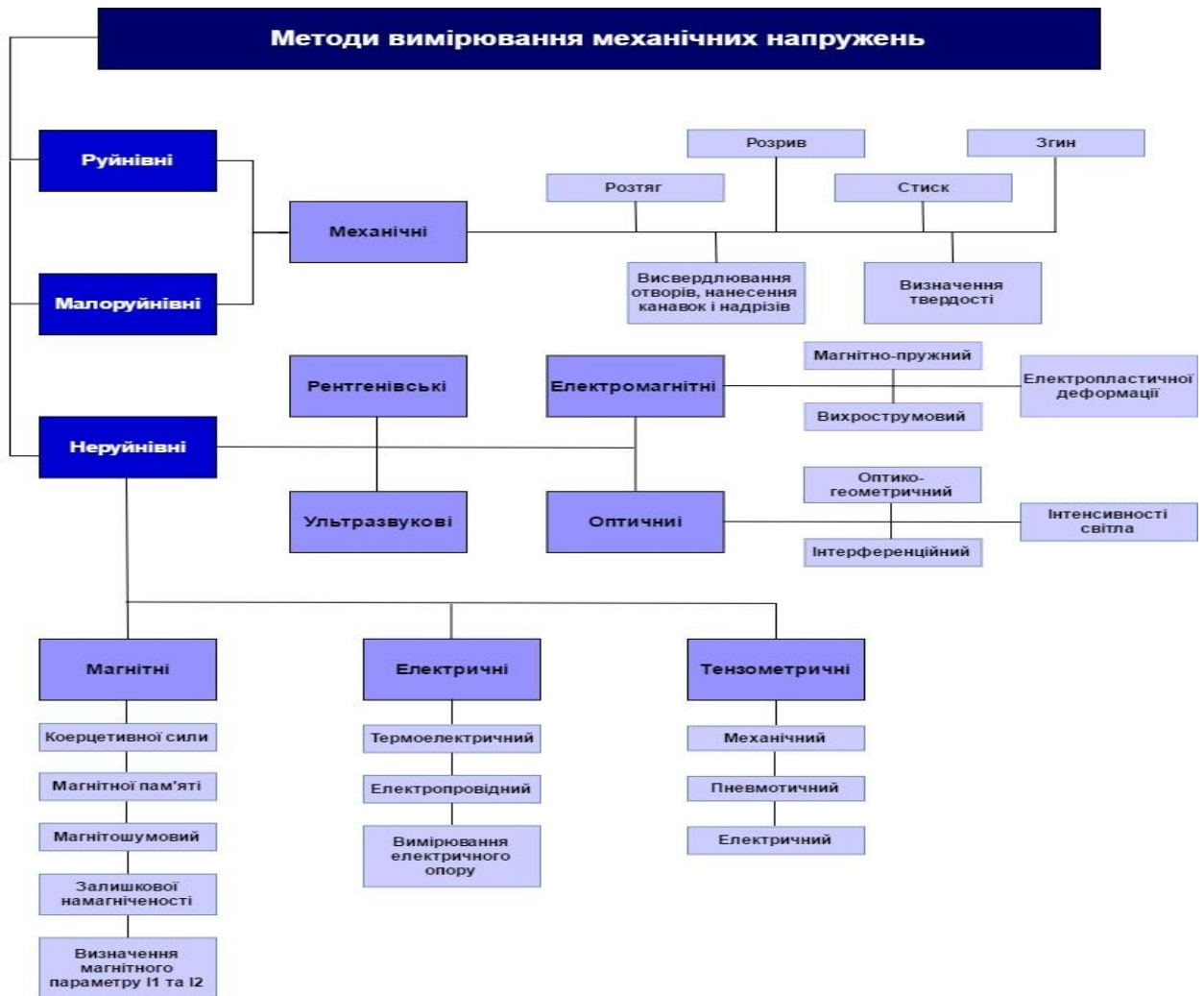


Рисунок 2 - .Класифікація методів вимірювання напружено – деформованого стану

Огляд сучасного стану проблеми дав змогу визначити мету і основні задачі подальших досліджень щодо розроблення приладової системи вимірювання напружень та деформацій з врахуванням методів корекції систематичної складової похибки в умовах дії дестабілізуючих факторів завдяки відсутності розриву вимірювальної ланки під час циклу корекції, малoshумлячих гальванічно ізольованих блоків живлення, методів, що забезпечують зменшення випадкової складової похибки, у тому числі флікер-шумів, вимірювальних перетворювачів для параметричних датчиків з частотним виходом з підвищеними метрологічними характеристиками тощо.

В результаті проведеного аналізу було сформульовано наукову проблему дисертаційних досліджень і виділено область невирішених теоретичних та практичних питань, пов'язаних з методологією забезпечення надійності складних конструкцій на різних етапах їхнього життєвого циклу через діагностику та вимірювання параметрів напружено – деформованого стану елементів складних конструкцій сучасними приладовими системами.

У другому розділі представлено результати теоретичних досліджень, спрямованих на розробку нових методів та засобів вимірювання напружень та

деформацій у складних конструкціях в умовах нечіткої вхідної інформації та стохастичної невизначеності з використанням теоретичних положень теорії напружень та деформацій, метрології, теорії вимірювань, теорії надійності, теорії вірогідності та математичної статистики.

Для контролю і забезпечення працездатності складних конструкцій розроблено модель діагностики та визначення напружено-деформованого стану складних конструкцій, змодельовано сценарії виникнення та розвитку небезпечно – напружених станів та відмов у складних технічних конструкціях, за допомогою яких можна прогнозувати небезпечні стани життєвого циклу конструкції та часові межі настання цих станів.

В число базових проблем обґрунтування розрахункових характеристик у ймовірнісній постановці в рамках теоретичної метрології та приладобудування входять наступні:

- розрахунково – експериментальний аналіз напружено – деформованих станів (σ, e) з врахуванням механічних P^e , термічних Q_t^e , аерогідродинамічних Q_{ah}^e навантажень; при цьому навантаження σ_{max}^e і деформації e_{max}^e є залежними від експлуатаційного числа циклів навантаження N^e , часу τ^e і температури t^e :

$$\{\sigma_{max}^e, e_{max}^e\} = F_e\{P^e, Q_t^e, Q_{ah}^e, Q_{rc}^e, N^e, \tau^e, t^e\}, \quad (1)$$

- аналіз закономірностей статичного, динамічного, циклічного та тривалого пружного деформування для вимірювань частот f_τ , амплітуд напружень σ_a^e і деформацій e_a^e , температур t^e і часу τ^e :

$$\{\sigma_{max}^e, e_{max}^e\} = F_{1e}\{f_\tau, (\sigma_a^e, e_a^e), t^e, \tau^e\}, \quad (2)$$

- аналіз критеріїв і умов вимірювання пошкоджень d^e , а також циклічної довговічності N_c^e , у випробуваннях об'єктів:

$$\{d^e, N_c^e\} = F_{2e}\{f_\tau, (\sigma_a^e, e_a^e), t^e, \tau^e\}, \quad (3)$$

Результати експериментальних і розрахункових досліджень на зразках, моделях і натурних конструкціях дають можливість виміряти напруження n_σ , деформації n_e , число циклів n_N , час n_τ , вплив зовнішнього середовища n_Φ і розмір тріщин n_l

$$\{n_\sigma, n_e, n_N, n_\tau, n_\Phi, n_l\} = \left\{ \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}^e}, \frac{e_c}{e_{max}^e}, \frac{N_c}{N^e}, \frac{\tau_c}{\tau^e}, \frac{\Phi_c l_c}{\Phi^e l^e} \right\}, \quad (4)$$

де індекс «с» відноситься до критичної (граничної) величини відповідної характеристики міцності, довговічності, тріщиностійкості, а індекс «е» - до відповідних величин при експлуатації.

Наявність розрахунково-експериментальної інформації про зусилля P , температури t , напруження σ , деформації e , а також критеріальних величин опору деформаціям і руйнуванню відповідних конструкційних матеріалів є основою для побудови граничних кривих:

$$P_c = \left\{ (\sigma_{пр}, e_{пр})_{maxk}, t, \tau, N \right\}, \quad (5)$$

де P_c - критичне (граничне) поєднання механічних P_m , теплових P_t та інших типів зусиль для різних режимів навантаження впродовж часу τ , числу циклів N , температури t .

Величини P_c , як правило, встановлюються за критеріальним величинам місцевих напружень $(\sigma_{пр})_{maxk}$ або деформацій $(e_{пр})_{maxk}$. Для цього використовують рівняння:

- кривих ізотермічної втоми (мало- або багатоциклової) для відповідних матеріалів:

$$\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{maxk}}, (e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}\}_c = f_N \left\{ \frac{N, \sigma_B, \psi_K, S_K}{\sigma_T, m} \right\}, \quad (6)$$

де σ_B - межа міцності, σ_T - межа текучості, S_K - опір відриву, ψ_K - відносне звуження при статичному розриві, m - показник зміцнення в пружнопластичній області;

-кривих тривалої ізотермічної міцності:

$$\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{maxk}}, (e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}\}_c = f_\tau \left\{ \frac{\tau, \sigma_B, \psi_K, S_K}{\sigma_T, m} \right\}, \quad (7)$$

-кривих статичної міцності при варіюванні температур t :

$$\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{maxk}}, (e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}\}_c = f_t \left\{ \frac{t, \sigma_B, \psi_K, S_K}{\sigma_T, m} \right\}, \quad (8)$$

Криві, що описуються рівняннями (6) і (7) для вимірювання напружень і деформацій в металевих конструкційних, як правило, мають монотонний вигляд (рис. 3): при збільшенні N і τ граничні значення руйнуючих (критичних) напружень і деформацій зменшуються.

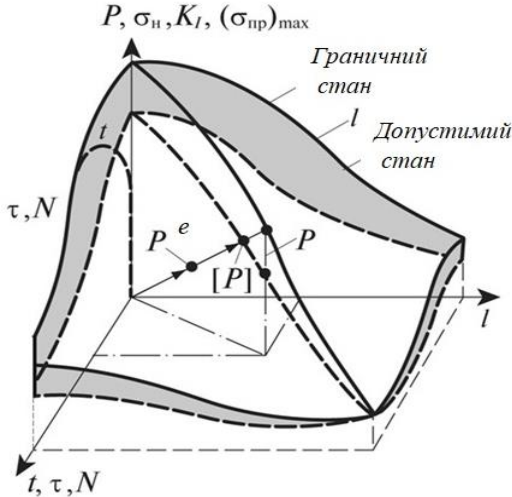


Рисунок 3 - Схема граничних і допустимих станів при вимірюванні міцності та ресурсу

Температурні залежності критичних напружень і деформацій (8) можуть мати в області низьких температур t немонотонний характер.

За граничними кривими (6) - (8) для заданого i -режиму, визначеного величинами $\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{maxk}}, (e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}\}_i$, встановлюють граничні (критичні) величини N_{ci} , τ_{ci} , t_{ci} , Φ_{ci} . Якщо для i -режиму задані значення N_i , τ_i , t_i , Φ_i , то з використанням кривих втоми, тріщиностійкості, тривалої міцності і стійкості до зовнішніх впливів можна оцінити величини накопичених пошкоджень:

$$\{d_i\} = \left\{ \left(\frac{N_i}{N_{ci}} \right), \left(\frac{\tau_i}{\tau_{ci}} \right), \left(\frac{t_i}{t_{ci}} \right), \left(\frac{\Phi_i}{\Phi_{ci}} \right) \right\}, \quad (9)$$

Якщо загальне число розглянутих режимів дорівнює k , то сумарне пошкодження на основі гіпотези лінійного підсумовування пошкоджень можна визначати за допомогою виразу (9), як суму:

$$d_\Sigma = \sum \{d_i\} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

Разом з цим, для випадків вираженого циклічного пружно-пластичного деформування вирази (9) і (10) можна трансформувати, прийнявши положення, що визначальним фактором пошкоджень d_i є накопичення циклічних пошкоджень N_i / N_{ci} , а фактори t_i , τ_i та Φ_i позначаються на граничній кількості циклів до руйнування. Тоді відповідно до моделей та методів про вимірювання напружено-деформованого стану, маємо:

$$d_\Sigma = \sum_i^k \{d_i\} = \sum_i^k \left\{ \frac{N_i}{N_{ci}} (\tau_i, t_i, \Phi_i) \right\} \leq 1, \quad (11)$$

Розроблено рівняння вимірювання при накопиченні пошкоджень складних конструкцій, що має вигляд:

$$w = \sum_z \frac{\alpha_k + 1}{l_k + 1} f_k(q_k) z_k^\alpha (1 - w)^{-r_k} \langle z_k \rangle, 0 \leq w \leq w_f < 1, h = e, p, c, \quad (12)$$

де w – нормована функція пошкодження; q_k – параметри напружено – деформованого стану і виду траєкторії деформування; z_k – нормовані долі дисипації на створення мікродефектів по механізмам багато циклової втоми z_e , мало циклової втоми z_p , повзучості z_c ; α_k, r_k – матеріальні параметри – функції температури; w_f – критичне значення мікротріщини.

Розроблено математичну модель впливу негаусівських завад та розроблено нелінійний метод гасіння негаусівських завад при отримуванні сигналу та обробці інформації засобами вимірювання на основі асимптотично оптимального прийому.

Стохастична модель спостереження в дискретному часі має вигляд:

$$y_h = s_{ih}(\lambda_{ih}, t_h) + n_h, h = 1, 2, \dots, q, \quad (13)$$

де y_h – реалізації складного коливання $Y(t)$, складовою якого є реалізація дискретного повідомлення λ_i ; $s_{ih}(\lambda_{ih})$ – вибірки, що являють собою, в загальному випадку, нелінійний оператор перетворення дискретного повідомлення λ_{ih} з ансамбля $\Lambda_i(t)$, який описує методи передачі маніпуляції і кодування сигналу-переносника і вважається повністю відомим; n_h – вибірка адитивної завади, що відображає випадковий процес з довільною, але відомою (гаусівською або негаусівською) одномірною і симетричною відносно нуля щільністю розподілу імовірностей; λ_{ih} – вибірки оцінюваного дискретного повідомлення $\lambda_i(t) = \lambda_i$ зі своїм розподілом імовірностей ($i = 1, 2, \dots$). Число вибірок (координат) H на інтервалі спостереження, що дорівнює тривалості переданого елементарного символу T_c становитиме $H = T_c/T_o$ (T_o – період формування вибірок).

Було зроблене припущення, що асимптотично оптимальний приймач працює у відповідності з алгоритмом максимальної правдоподібності. При цьому він обчислює функцію правдоподібності для всіх «а» можливих значень дискретного повідомлення λ_i , а вирішальний пристрій приймає рішення у відповідності до виразу:

$$\lambda_i = \max_{i=\overline{1,a}} \{Q_{ao}(\lambda_i)\} \quad (14)$$

де $Q_{ao}(\lambda_i) = \ln w_{\lambda_i}(y)$ – вихідний сигнал асимптотично оптимального фільтруючого пристрою; $w_{\lambda_i}(y)$ – функція правдоподібності.

Якщо припустити, що вибірки завад $n_h = n(t_h)$ являють собою випадкові величини з похідною щільності розподілу імовірностей і утворюють процес з незалежними значеннями (білий шум), то вираз для функції правдоподібності $w_{\lambda_i}(y)$ буде:

$$w_{\lambda_i}(y) = \prod_{h=1}^H w_{\Pi}[y_h - s_n(\lambda_i)], \quad (15)$$

де $w_{\Pi}[y_h - s_n(\lambda_i)] = w_{\Pi}$ – щільність розподілу імовірностей завади.

Розклавши натуральний логарифм функції правдоподібності в ряд Тейлора і, обмежившись першим лінійним членом, отримано вираз для вихідного ефекту, що описує роботу асимптотично оптимального фільтруючого пристрою приймача:

$$Q_{ao}(\lambda_i) = \ln w_{\lambda_i}(y) = \sum_{h=1}^H Z_{ao}(y_h) s_{oh}(\widehat{\lambda_{ih}}), \quad (16)$$

де $Z_{ao}(y_h) \approx Z_{ao}(n_h) \approx -d \ln w_{\Pi}(y_n) / dy_n \approx -d \ln w_{\Pi}(n_n) / dn_n$ - амплітудна характеристика безінерційного блоку перетворення негаусівських завад.

Запропоновано структурну схему вимірювальної приладової системи (рис.4), модель діагностики та визначення напружено- деформованого стану конструкцій на основі мостової вимірювальної схеми з тензорезисторами з диференціальною схемою підключення.

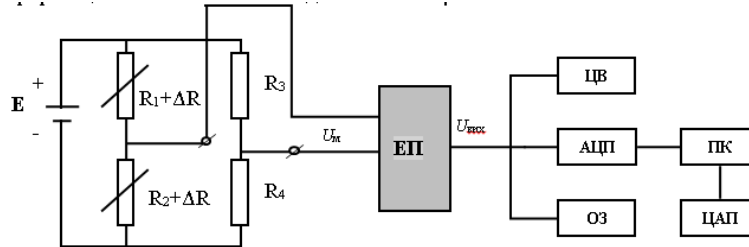


Рисунок 4 – Структурна схема вимірювальної приладової системи:

ЕП - електронний підсилювач постійного струму; ЦВ - цифровий вольтметр; АЦП – аналого - цифровий перетворювач; ОЗ - запам'ятовуючий осцилограф; ПК - персональний комп'ютер; ЦАП – цифро - аналоговий перетворювач

Розроблено моделі, методи та рекомендації вимірювання напруження, що містять засоби визначення величини похибок вимірювання, які дають можливість більш точно оцінити показники вимірювання механічних величин.

У **третьому розділі** запропоновано теоретичні основи побудови приладової системи, як специфічної системи управління, особливість якої полягає у вимірюванні параметрів напружено – деформованого стану об'єкта діагностування.

Конструкція і технологічне призначення об'єкта визначає функціональну структуру приладової системи (рис. 5).

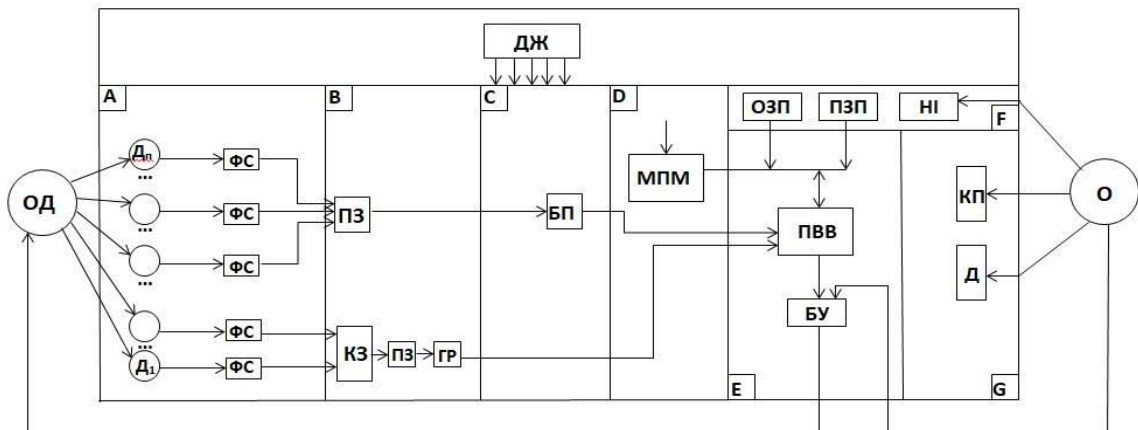


Рисунок 5 - Функціональна схема приладової системи:

ОД – об'єкт дослідження; $D_1...D_n$ – датчики; ФС – пристрій формування сигналів; ПЗ – передавач зв'язку; ГР – схема гальванічної розв'язки; КЗ – концентратор зв'язку; БП – блок перетворення; ДЖ– джерело живлення; МПМ – мікропроцесорний модуль; ОЗП та ПЗП – оперативний та постійний запам'ятовуючий пристрій; НІ – накопичувач інформації; КП – клавішний пристрій; БУ – блок управління; ПВВ – пристрій вводу/виводу; О – оператор

Запропоновано аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків (рис. 6).

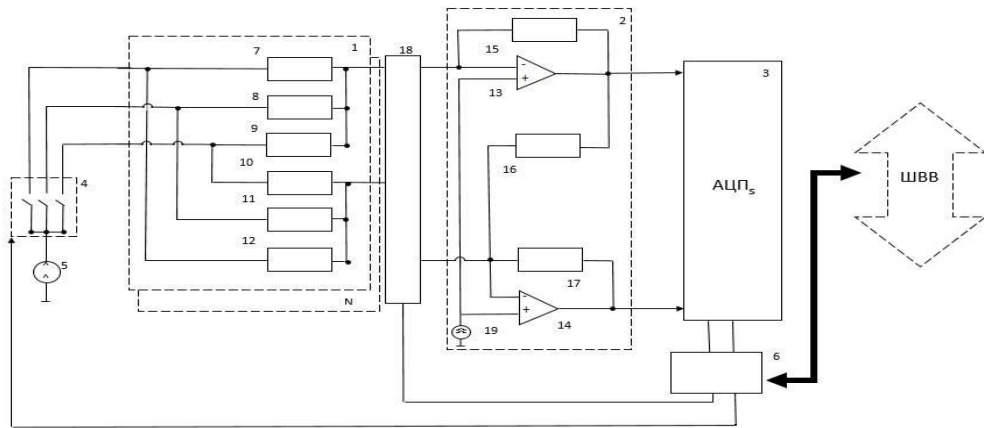


Рисунок 6 - Схема електрична, функціональна аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків:

1- вимірювальний ланцюг; 2 - вимірювальний підсилювач з диференціально – струмовими входами; 3 - двоканальний аналого-цифровий перетворювач; 4 - аналоговий демультимплексор; 5 - джерело постійного струму; 6 - мікроконтролер; 7 - резистивний тензодатчик; 8 - 11 - зразкові резистори; 12 - підстроювальний резистор; 13 - 14 - операційні підсилювачі; 15 - 17 - резистори; 18 –диференціальний мультиплексор; 19 – ЕРС, що є еквівалентом корельованих шумів та напруги в «земляному» контурі через «спільний» опір.

Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань напруження та деформацій за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків працює наступним чином. Цикл вимірювання складається з чотирьох робочих тактів. В першому такті демультимплексор 4 знаходиться в «третьому стані», тобто коли всі ключі даного демультимплексора закриті і струм ініціалізації I_0 не потрапляє у вимірювальний ланцюг 1. При цьому результати вимірювання вихідних напруг операційних підсилювачів ОП₁ та ОП₂ запам'ятовуються в пам'яті комп'ютера під назвою «U₁₁» та «U₁₂». В другому такті ключ К₁ демультимплексора 4 замикається, ключі К₂ та К₃ розімкнені. В цьому випадку запам'ятовуються результати вимірювання операційних напруг операційних підсилювачів ОП₁ та ОП₂ під назвою: «U₂₁» та «U₂₂».

В третьому такті замикається ключ К₂ до демультимплексора 4, а ключі К₁ та К₃ – розімкнені. В такому випадку результати вимірювання операційних напруг операційних підсилювачів ОП₁ та ОП₂.

У четвертому такті ключі К₁ та К₂ розімкнені, а ключ К₃- замкнений. В цьому випадку запам'ятовуються результати вимірювання операційних напруг операційних підсилювачів ОП₁ та ОП₂ під назвою : «U₄₁» та «U₄₂».

Скорегований результат вимірювання обчислюємо за формулою:

$$\delta = \delta_{\text{ном}} \cdot \left[\frac{U_{22}-U_{12}}{U_{21}-U_{11}} \cdot \frac{U_{42}-U_{12}}{U_{41}-U_{11}} \right], \quad (17)$$

На рис.7 наведено електричну схему вимірювального каналу в програмному середовищі Elektronik Workbench.

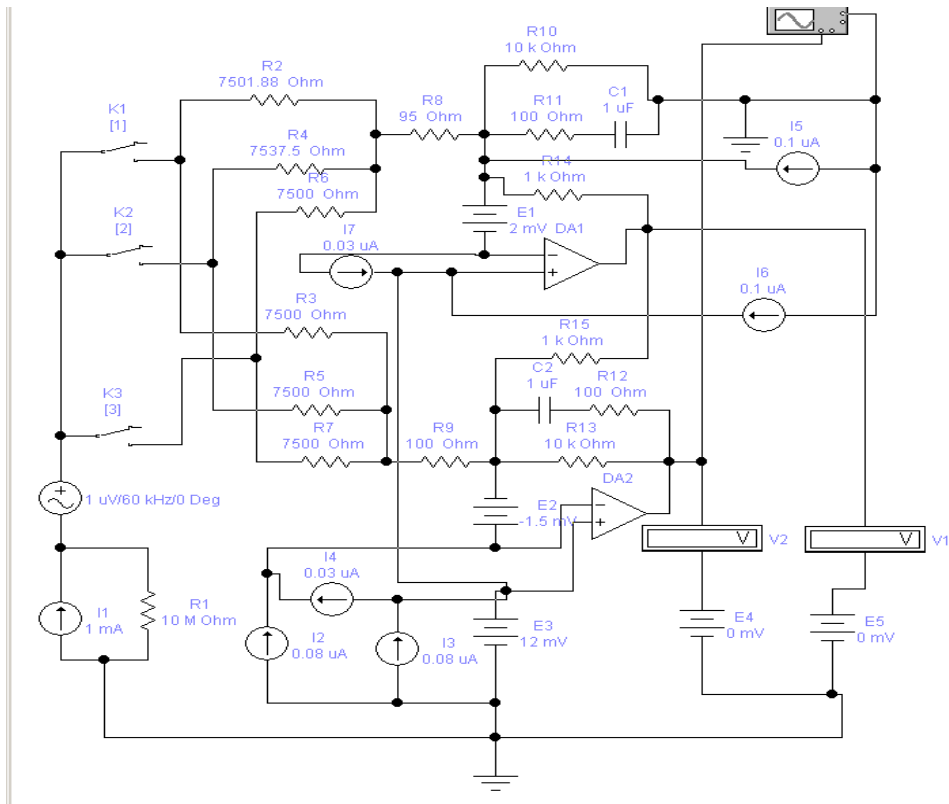


Рисунок 7 - Електрична схема вимірювального каналу в програмному середовищі Elektronik Workbench

Використовуючи програмне середовище NUMERY, було визначено регресійне рівняння функції перетворення вимірювального каналу, що дозволило визначити систематичні та випадкові складові похибки вимірювального каналу без врахування похибок датчика.

Тоді регресійне рівняння функції перетворення вимірювального каналу першого порядку буде мати наступний вигляд:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2, \quad (18)$$

де $a_0 = -6,95 \cdot 10^{-6}$, $a_1 = 1,000163$, $a_2 = 0,00007$, $\sum \delta_{\text{нев}}^2 = 9,48 \cdot 10^{-8}$ - коефіцієнти регресії; y - вихідний сигнал на виході вимірювального підсилювача; x - поточне значення вхідної вимірювальної величини; $\sum \delta_{\text{нев}}^2$ - сума квадратів нев'язок між поточним значенням вихідної величини та її математичним очікуванням.

Встановлено клас точності згідно двочленної формули:

$$\delta_B = \pm \left[C + d \left(\frac{x_H}{x} - 1 \right) \right] \quad (19)$$

де δ_B - відносна похибка вимірювання; C , d - коефіцієнти: $C = \gamma_{\Sigma} + d$, γ_{Σ} - максимальне значення підсумкової мультиплікативної похибки $\gamma_{\Sigma} = \gamma + \gamma_{\text{нел.мах}}$, де γ - мультиплікативна похибка, $\gamma = \left(\frac{a_1}{a_1^*} - 1 \right) \cdot 100\% \approx 0,0163\%$, a_1^* - ідеальне значення коефіцієнту a_1 ; $a_1^* = 1$; $\gamma_{\text{нел.мах}}$ - максимальне значення похибки не лінійності (інтегральна не лінійність). $\gamma_{\text{нел.мах}} \approx \frac{a_2}{a_1} \cdot x_H \approx 0,007\%$, x_H - максимальне значення вхідної величини; $x_H = 0,5\%$. Тоді $\gamma_{\Sigma} = 0,0163 + 0,007 \approx 0,025\%$

Отримано сумарне значення приведеної адитивної похибки, яке дорівнює:

$$d = \frac{a_0 - a_1^* + 3\sigma_{\text{пр}}}{\delta_{\text{ном}}} = \frac{-6,95 \cdot 10^{-6} + 3(7 \cdot 10^{-5})}{0,5} \cdot 100\% = 0,05\%,$$

де a_0^* - ідеальне значення коефіцієнту a_0 ; $a_0^* = 0$; $\sigma_{\text{пр}}$ – приведенне значення середньоквадратичної випадкової складової похибки, що визначається за формулою: $\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\sum \delta_{\text{нев}}^2}{n-1}}$, n - кількість вимірювань.

Якщо нехтувати величинами другого порядку малості, то сумарна мультиплікативна похибка буде дорівнювати: $C = 0,025 + 0,05 = 0,075\%$.

Таким чином метрологічні характеристики оцінені класом точності, який буде мати значення: 0,075/0,05, що на порядок перевищує точність існуючих аналогів при інших рівних умовах.

Графік залежності відносної похибки вимірювання від значення вхідної величини наведено на рис. 8.

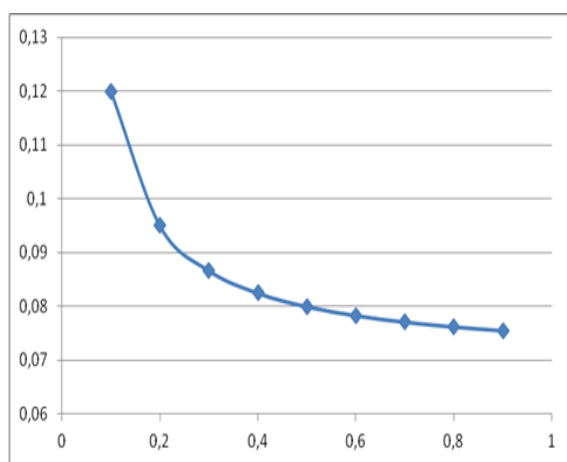


Рисунок 8 - Графік залежності відносної похибки вимірювання від вхідної величини

Побудовано математичну модель роботи цифрового первинного перетворювача на основі миттєвих та середніх значень частоти, а також фази сигналу, що включає метод визначання напруження на основі сигналу.

Розроблено структурну схему цифрового первинного перетворювача, що включає мікропроцесорний вимірювач, а також системи приладів, що додатково мітять аналізатор якості сигналу, на основі математичної моделі.

У четвертому розділі розглянуто підходи щодо оптимізації метрологічних характеристик вимірювання перетворювачів деформації.

Для корекції похибок датчиків, функція перетворення яких, як правило, є нелінійною та зазнає впливу різноманітних дестабілізуючих факторів, основним з яких є температура, використовуються на сьогоднішній день методи автоматичної корекції на основі методу допоміжних вимірювань, який регламентуються міжнародним стандартом IEEE 1451.02, що передбачає використання множини функцій перетворень, декількох еталонних значень вхідної величини під впливом різних значень дестабілізуючого фактору (TEDS). Ці дані використовуються для отримання скорегованого результату шляхом вирішення систем нелінійних рівнянь.

Даний метод є універсальним, дозволяє скорегувати не лише похибки нелінійності вимірювального каналу та додаткові похибки, але й похибки, пов'язані з впливом завад загального виду через опір заземлення, який спонукає зв'язок між вимірювальними каналами основного та дестабілізуючого фактору.

Встановлено основні дестабілізуючі фактори, які обмежують точність вимірювання з використанням тензодатчика, є:

- Випадкові процеси (шуми, завади тощо);

- Часові зміни параметрів вимірювальних перетворювачів внаслідок старіння та фізичної деградації;
- Впливи зовнішніх кліматичних та механічних факторів (температура, вологість тощо).

Систематичні похибки є найбільш вагомими при статистичних вимірюваннях є похибки нелінійності та температурна складова похибки.

Дослідженнями встановлено, що похибка, викликана зміною температури в декілька градусів в межах 24°C, є досить малою (менше 0,5 мкм/м°C). Однак при суттєвих змінах температури вона збільшується, що вимагає відповідної корекції. З цією метою необхідно виміряти температуру поблизу датчика і використати залежність вимірювальної похибки від температури.

Було досліджено вплив діапазону зміни температур для сплавів константана та карми, розкиду значень температурної похибки ($\pm 10\%$) на середньоквадратичне значення похибки апроксимації степеневими поліномами.

За допомогою пакету NUMERY було визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого поліному. Отримано наступні дані (табл.1, табл. 2).

Таблиця 1

Таблиця поліноміальних коефіцієнтів для константана

Поліноміальні коефіцієнти	Порядок поліному					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX
a_0	-16,4277781	-15,0129174	-6,3200432	-14,2274504	-13,276337	-16,29822
a_1	1,5921428	1,8995044	2,0483683	2,3282625	1,7345866	1,5277609
a_2	-0,046261	-0,048572	-0,0579458	-0,0484233	-0,0467915	-0,0378965
a_3	0,0002543	0,0002015	0,000209	0,0000271	0,0003704	0,0004673
a_4	$-2,6037 \cdot 10^{-7}$	$2,6784 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$8,25445 \cdot 10^{-7}$	$-2,07862 \cdot 10^{-6}$	$-6,14724 \cdot 10^{-6}$
a_5		$-1,20735 \cdot 10^{-9}$	$-1,00141 \cdot 10^{-8}$	$1,39213 \cdot 10^{-8}$	$-1,59733 \cdot 10^{-8}$	$-3,43268 \cdot 10^{-9}$
a_6			$1,67747 \cdot 10^{-11}$	$-1,10787 \cdot 10^{-10}$	$3,56472 \cdot 10^{-10}$	$7,43916 \cdot 10^{-10}$
a_7				$2,08264 \cdot 10^{-13}$	$-1,80145 \cdot 10^{-12}$	$-5,748 \cdot 10^{-12}$
a_8					$2,87103 \cdot 10^{-15}$	$1,70738 \cdot 10^{-14}$
a_9						$-1,80353 \cdot 10^{-17}$
$\sum \theta^2$	2827,9491538	2227,5429176	1498,0882269	849,1320204	210,7311456	97,2128335
$\sigma_{[\%]}$	0,75	0,65	0,5	0,4	0,2	0,14

Середньоквадратичне значення похибки апроксимації (у відсотках)

$$\sigma_{[\%]} \text{ визначатиметься за формулою: } \sigma_{[\%]} = \sqrt{\frac{\sum \theta^2}{n-1}} / \delta_{\text{nom}} \cdot 100\% , \quad (20)$$

де θ^2 - сума квадратів нев'язок; n - кількість результатів вимірювань; δ_{nom} - номінальна деформація пружини, оvd.

Як видно з табл. 1 і табл. 2, середньоквадратичне значення похибки в широкому температурному діапазоні як для константану, так і для карми має слабкий зв'язок з порядком поліному.

Було також досліджено вплив точності запису табульованих значень на поліноміальні коефіцієнти і визначено, що випадкова похибка визначення коефіцієнтів розміром до $\pm 10\%$ для константана практично не впливає на значення середньоквадратичної похибки апроксимації.

Таблиця 2

Таблиця поліноміальних коефіцієнтів для карми

Поліноміальні коефіцієнти	Порядок поліному					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX
a_0	-59,4985896	-59,2890159	-59,4350495	-60,8352669	-61,1024734	-62,4482056
a_1	2,3378146	2,383342	2,3808412	2,430404	2,5971917	2,5050862
a_2	-0,0073338	-0,0076761	-0,0075186	-0,0058324	-0,0062909	-0,0023297
a_3	-0,0000311	-0,0000389	-0,000039	-0,0000712	0,0001677	-0,0001245
a_4	$8,45742 \cdot 10^{-8}$	$1,62815 \cdot 10^{-7}$	$1,416 \cdot 10^{-7}$	$1,67130 \cdot 10^{-8}$	$8,32583 \cdot 10^{-7}$	$-9,79289 \cdot 10^{-7}$
a_5		$-1,78836 \cdot 10^{-10}$	$-3,08899 \cdot 10^{-11}$	$4,20751 \cdot 10^{-9}$	$1,26061 \cdot 10^{-8}$	$1,81908 \cdot 10^{-8}$
a_6			$-2,81803 \cdot 10^{-13}$	$-2,28700 \cdot 10^{-11}$	$-1,54142 \cdot 10^{-10}$	$1,83977 \cdot 10^{-11}$
a_7				$3,68788 \cdot 10^{-14}$	$6,0149 \cdot 10^{-13}$	$-1,15602 \cdot 10^{-12}$
a_8					$-8,06588 \cdot 10^{-16}$	$5,51833 \cdot 10^{-15}$
a_9						$-8,03164 \cdot 10^{-18}$
$\sum \theta^2$	401,7717577	388,5985531	388,3926909	368,043922	317,6564148	295,1436973
$\sigma_{[\%]}$	0,28	0,27	0,27	0,265	0,247	0,24

Запропоновано спосіб цифрової температурної корекції похибок, який полягає в наступному:

- 1) Визначаємо значення похибки для певних значень вхідної величини з кроком 10%, починаючи з «нуля»;
- 2) За визначеною температурою датчика визначаємо значення похибок для всіх реперних точок;
- 3) Апроксимуємо залежність поліномом шостого порядку;
- 4) Визначаємо поправку для отриманого результату вимірювання за цим поліномом і обчислюємо скорегований результат.

Для перевірки цього алгоритму промодельюємо температурну похибку впливом зміни жорсткості пружини тензодатчика, зумовленої температурною залежністю модуля пружності E . Для пружинної сталі $\frac{\delta E}{dt} = -24 \cdot 10^{-5} \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)$, що буде відповідати мультиплікативній похибці $\gamma = 24 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\%}{^\circ\text{C}}\right)$, а також не лінійність функції перетворення датчика модуляцією інших коефіцієнтів.

При розрахунку було взято припущення, що матеріал, з якого виготовлена пружина тензодатчика, має температурний коефіцієнт $\theta = \frac{\delta E}{dt} = -10^{-3} \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)$, (21) що значно перевищує реальний температурний коефіцієнт пружинної сталі.

Тоді деформація пружини тензодатчика буде визначатися:

$$\varepsilon_x = x + (1 + \theta) \cdot 10^{-3} \cdot t, \quad (22)$$

де x – «ідеальне» значення відносної деформації; θ – температурний коефіцієнт; t – робоча температура пружини.

За допомогою пакету NUMERY отримуємо коефіцієнти лінійної регресії підсумкової похибки від температури:

$$y = a_0 + a_1 x \quad \begin{cases} a_0 = 0,025 \\ a_1 = 0,000025, \\ \sum \delta_i = 0 \end{cases} \quad (23)$$

де y — абсолютна похибка; x — значення вимірювальної величини; a_0, a_1 — коефіцієнти лінійної регресії; $\sum \delta_i$ — сума квадратів нев'язок.

Обчислене значення вхідної величини за запропонованою методикою повністю співпадає з теоретичним значенням вхідної величини.

Це означає, що запропонований алгоритм дозволяє коригувати похибки датчика за допомогою використання TEDS. Ефективність алгоритму в умовах нелінійності температурної похибки буде визначатися з точністю підгонки апроксимуючого полінома.

В табл. 3 наведено апроксимуючі поліноми для датчиків на основі константану і показано, що похибка апроксимації буде вже практично нулевою при шостому порядку апроксимуючого поліному. Це означає, що широко відомий метод корекції похибок, запропонований Фішером, буде, практично, неможливо використати в даному випадку через значне зростання обсягу обчислень при збільшенні порядку поліномів, оскільки у цьому методі полінома обмежується третім порядком у зв'язку із значним збільшенням обчислень, необхідних при збільшенні порядку апроксимуючого поліному. В той же час, запропонований нами алгоритм цифрової температурної корекції похибок є вільним від зазначених недоліків через те, що не залежить від ступеню апроксимуючого поліному.

Таблиця 3

Результати моделювання цифрової температурної корекції похибок

Ідеальне значення вимірювальної величини t	Температурна похибка $\varepsilon(t)$	Реальна деформація при 25°C $\varepsilon(25^\circ\text{C})$	Абсолютна температурна похибка $\delta = \varepsilon(25^\circ\text{C}) - \varepsilon(t)$, іод.
0	$\varepsilon_0 = 10^{-3} \cdot t$	$25 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-3}$
10	$\varepsilon_{10} = 1,01 \cdot 10^{-3} \cdot t + 10$	10,02525	0,02525
20	$\varepsilon_{20} = 1,02 \cdot 10^{-3} \cdot t + 20$	20,0255	0,0255
30	$\varepsilon_{30} = 1,03 \cdot 10^{-3} \cdot t + 30$	30,02575	0,02575
40	$\varepsilon_{40} = 1,04 \cdot 10^{-3} \cdot t + 40$	40,026	0,026
50	$\varepsilon_{50} = 1,05 \cdot 10^{-3} \cdot t + 50$	50,02625	0,02625
60	$\varepsilon_{60} = 1,06 \cdot 10^{-3} \cdot t + 60$	60,0265	0,0265
70	$\varepsilon_{70} = 1,07 \cdot 10^{-3} \cdot t + 70$	70,02675	0,02675
80	$\varepsilon_{80} = 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot t + 80$	80,027	0,027
90	$\varepsilon_{90} = 1,09 \cdot 10^{-3} \cdot t + 90$	90,02725	0,02725
100	$\varepsilon_{100} = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot t + 100$	100,0275	0,0275

При автоматизованій повірці приладової системи був застосований метод каліброваних сигналів. Найбільш високий рівень автоматизації повірки з використанням калібраторів досягається при використанні програмно — керованої міри. Як показано на рис. 9, на повірочний засіб вимірювань подається тестовий сигнал з керованої ПК міри. Сигнал, що спостерігається на виході повірочного засобу, перетворюється у цифровий код і порівнюється з кодом тестового сигналу. На основі порівняння кодів визначається похибка в певній точці діапазону вимірювання. Процедура, згідно якої обробка

результатів вимірювань здійснюється за певним програмним алгоритмом, повторюється в кожній вимірюваній точці шкали засобу вимірювання.

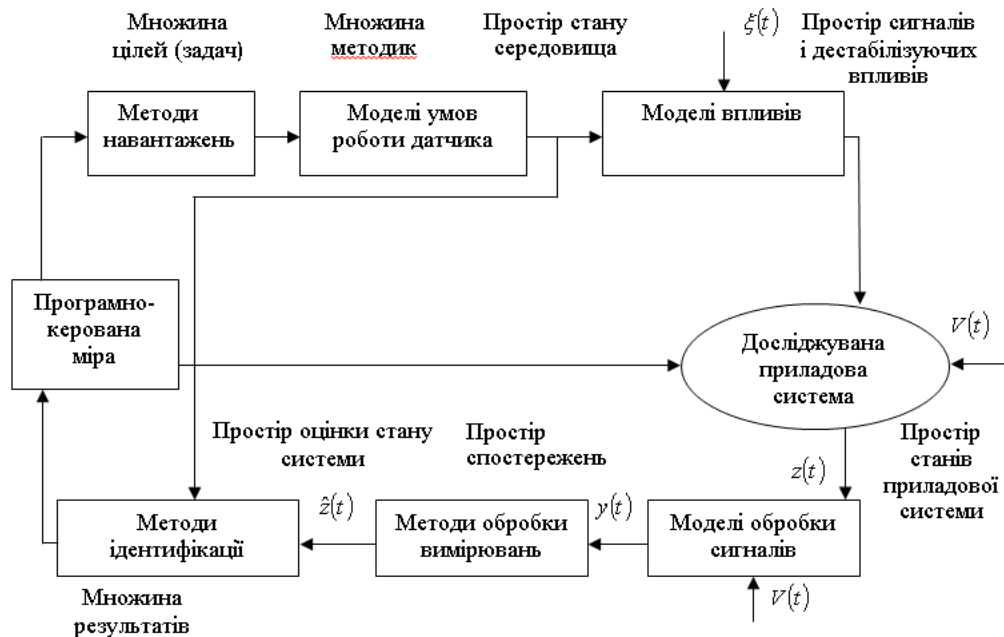


Рисунок 9 - Модель повірочного комплексу приладової системи

Запропонована модель повірочної приладової системи, в якій некалібрований сигнал автоматично здійснює визначення похибки та розраховує автоматичну її корекцію. Це значення сигналу вимірюється взірцевим засобом вимірювання. Значення сигналу з відлікового пристрою та взірцевого обробляється за допомогою ПК з метою розрахунку метрологічних характеристик повірочного комплексу.

В такій установці можуть повірятися також вимірювальні перетворювачі. На вхід перетворювача подаються сигнали на досліджуваний перетворювач, що вказані у нормативній документації. Оптимальним буде такий метод повірки, коли при зниженні затрат на проведення повірки підвищиться якість повірки засобів вимірювань.

Мінімізація помилок оцінювання вектора z пов'язана з визначенням центра ваги \hat{z} функції $w_1(z/y)$ при отриманому значенні вектора спостережень y .

Реалізований відповідно до рис.9 комплекс вирішує такі основні завдання випробування і перевірки приладової системи:

- моделювання динаміки датчика з довільним положенням об'єкта вимірювання з різними рівнями моделювання;
- формування адекватної електромагнітної обстановки (сигналів і завад);
- моделювання середовища поширення сигналів;
- оперативної зміни вихідних даних, динамічного управління процесом випробувань в реальному часі;
- збору та обробки поточних значень параметрів датчиків системи і відображення в реальному часі;
- спектрально-кореляційного аналізу та документування результатів досліджень.

Розрахунок математичної методичної похибки і середнього квадратичного відхилення методичної похибки при квантуванні суми вхідних впливів і адитивної завади.

Нехай x_j та n_j відповідно вхідний вплив і завада в j -му вимірювальному експерименті. На вхід АЦП поступає сума $x_j + n_j$. Тоді прийнятий алгоритм (рівняння вимірювань) матиме вигляд:

$$x_j^* = \left[[x_j + n_j]_{\Delta_n x} [m_x]_0 \right]_0, \quad (24)$$

Оскільки істинне значення x_j визначається рівнянням:

$$x_j = \left[[x_j]_0 [m_x]_0 \right]_0, \quad (25)$$

то методична похибка при вимірюванні буде:

$$\Delta_m x_j^* = \left[[x_j + n_j]_{\Delta_n x} [m_x]_0 \right]_0 - \left[[x_j]_0 [m_x]_0 \right]_0 = \Delta_n^m x_j^* + \Delta_k^m x_j^*, \quad (26)$$

де

$$\begin{aligned} \Delta_n^m x_j^* &= \left[[x_j + n_j]_0 [m_x]_0 \right]_0 - \left[[x_j]_0 [m_x]_0 \right]_0 \\ \Delta_k^m x_j^* &= \left[[x_j + n_j]_{\Delta_n x} [m_x]_0 \right]_0 - \left[[x_j + n_j]_0 [m_x]_0 \right]_0. \end{aligned}$$

Перша складова дорівнює n_j і її характеристики відповідають характеристикам завади, тобто:

$$M[\Delta_n^m x_j^*] = M[n_j]; \quad D[\Delta_n^m x_j^*] = D[n_j]. \quad (27)$$

Друга складова обумовлена квантуванням суми двох випадкових величин: $z = x + n$.

Отримано значення для імовірності виникнення завади:

$$p = 1 - \int_{-\frac{\Delta_n}{2}}^{\frac{\Delta_k x}{2}} \frac{1}{X_{max} \Delta_n} \left(y + \Delta_k x + \frac{\Delta_n}{2} \right) dy - \int_{\frac{\Delta_k x}{2}}^{\frac{\Delta_n}{2}} \left(-\frac{1}{X_{max} \Delta_n} + \frac{1}{2X_{max}} \right) dy, \quad (28)$$

П'ятий розділ присвячено експериментальним дослідженням, що були проведені в лабораторних умовах на базі кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету.

Реєстрація даних в ході випробовувань та обробка отриманої інформації здійснювалися за допомогою програмно-апаратного комплексу (приладової системи), створеного на базі кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету.

Загальний вигляд програмно-апаратного вимірювального комплексу (приладової системи) показано на рис. 10. У апаратну частину комплексу входять: блок введення аналогових сигналів, включаючи прецизійні джерела живлення, в тому числі - для тензометричних датчиків; системний блок аналого-цифрового перетворення на основі дельта-сигма АЦП і обчислювального пристрою.

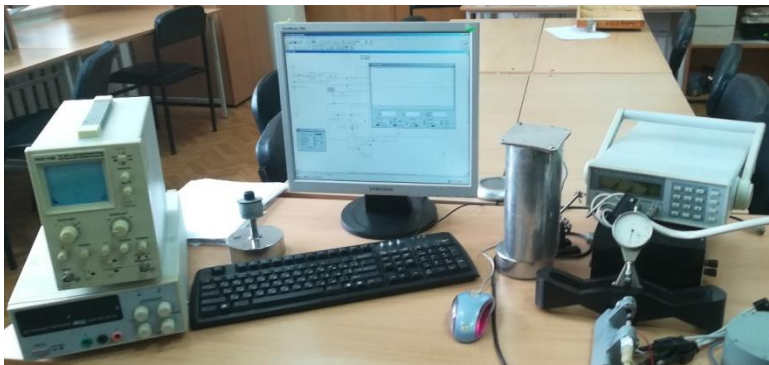


Рисунок 10 – Приладова система (програмно-апаратний комплекс) вимірювання напружень

Випробовування здійснювалися на основі тензорезисторного методу вимірювання напружень, що здійснюється таким чином. На завантажений елемент заклеюється один з типів тензорезисторів і вимірюється напруження за допомогою індикаторного приладу. Після цього на

точно такий же, тільки ненавантажений еталонний елемент наклеюється аналогічний тензорезистор і знімаються покази індикаторного приладу. За різницею показів індикаторних приладів визначаємо величину напружень в навантажених елементах конструкції.

Для дослідження тензорезисторного методу вимірювання напруження був здійснений експеримент, для якого була обрана сталева балка рівного опору.

Випробовування зразка проводилися за допомогою експериментальної механічної установки, на якій здійснювався вигин балки за допомогою її поступового навантаження.

Особливість експерименту (рис. 11) полягала в тому, що експериментальну балку розмірами 305 мм x 49 мм x 17,5 мм x $t = 6,8$ мм спочатку навантажили гирями загальною вагою 7 кг і після навантаження наклеїли тензорезистор (1) на цю балку. Потім наклеїли робочий тензорезистор (2), і осушили його згідно стандартам наклеювання. Через 12 годин після наклеювання до стисненого резистора (1), робочого резистора (2) та компенсаційних тензорезисторів підключалася реєстраційна апаратура за допомогою монтажних дротів, і починалося вимірювання. В експерименті завантажували балку, навантажуючи на неї по 1 кг зразкових гирь.



Рисунок 11 – Експериментальна балка з наклеєними тензорезисторами

Графіки запису показів вимірювання стисненого тензорезистора (1) наведено на рис. 12, а робочого 2) - на рис. 13. З графіків видно, що обидва тензорезистора при завантаженні балки показують розтягнення, стиснений тензорезистор наближається до нуля, а робочий - до мінусових позначок ($\sigma_{\max} \approx -570$ кг/см²). При розвантаженні балки обидва тензорезистора показують стиснення, причому стиснений тензорезистор наближається до високих позначок ($\sigma_{\max} \approx +570$ кг/см²), а робочий - до нуля.

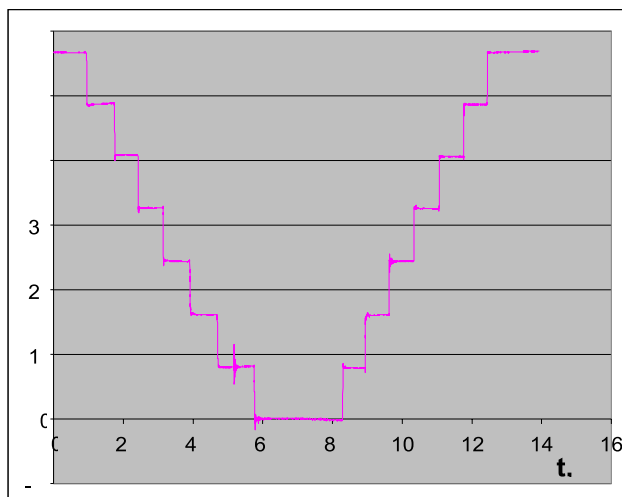


Рисунок 12 - Графік зміни напружень згідно показів стиснутого тензорезистора (1)

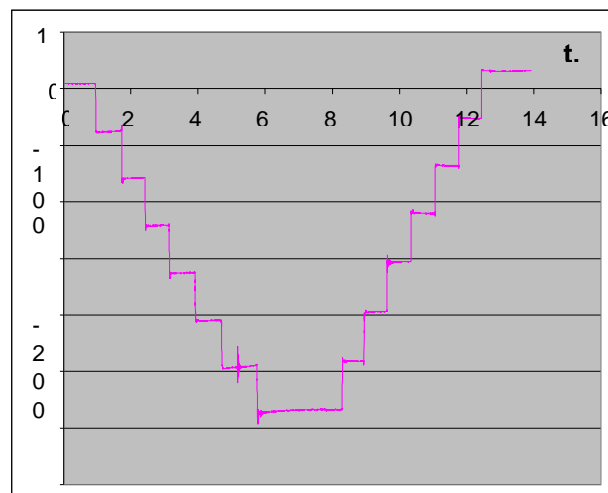


Рисунок 13 - Графік зміни напружень згідно показів робочого тензорезистора (2)

Експериментальні дослідження, проведені при різних напруженнях на виході напівпровідникового тензоперетворювача і на керуючому електроді, підтвердили адекватність математичної моделі і ефективність створеної методики розробки напівпровідникових тензоперетворювачів.

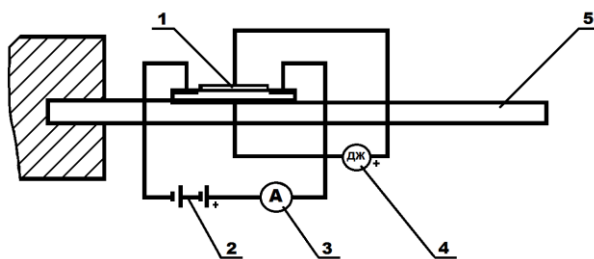


Рисунок 14 – Макет для проведення експерименту:

1 - тензоперетворювач; 2 - джерело постійного струму; 3 - мікроамперметр;
4 - регульоване джерело живлення; 5 - консольна балка

У результаті проведеного аналізу похибок було виявлено домінуючі фактори, що роблять основний вплив на похибку вихідного сигналу тензоперетворювача. Розрахована наведена похибка вимірювань тензоперетворювача, виготовленого за сучасними інтегральним технологіям, складова не більше 0,5%.

Для тарувального випробування використовувалися тарувальні балки, які завантажуються зразковими ваговими гирями. В якості перетворювачів використані П-образні магнітопроводи, що мають намагнічувальні та вимірювальні обмотки. Довжина магнітопроводу 25 мм, ширина 5 мм. Результати тарувального випробування наведені на рис. 15.

Експериментальні дослідження проведені на тарувальних балках після посилення. Для посилення балок використовувалися листові сталі, вирізані за розміром тарувальної балки товщиною 2 мм. Результати вимірювання тиску наведені на рис. 16.

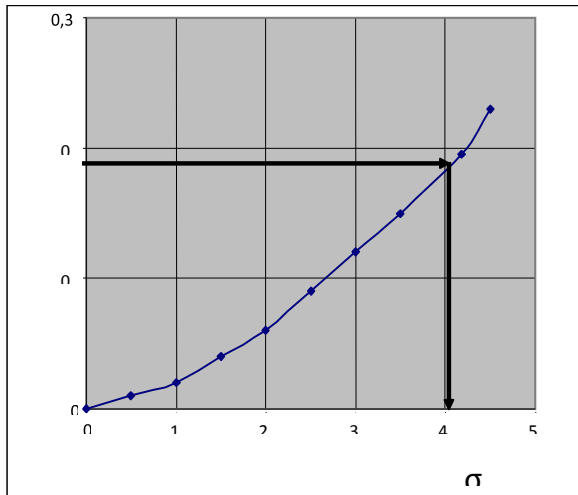


Рисунок 15 - Тарувальна крива для визначення напружень в елементах металевих конструкцій; вісь абсцис - напруга, мПа; вісь ординат - відносна зміна площі магнітних властивостей

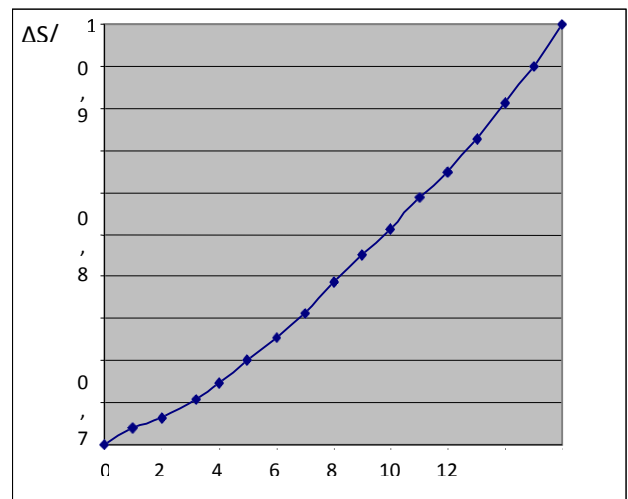


Рисунок 16 - Визначення напружень в елементах металевих конструкцій за тарувальною кривою

Результати експерименту показали, що вимірюване значення напруження в посиленій балці 40,75 мПа. Теоретичне значення напруження 41,8 мПа. Абсолютна похибка - 1,05 мПа, відносна похибка становить - 2,51%. Таким чином, отримане значення напружень в посилених елементах металевих конструкцій показує високу точність вимірювальної системи.

Також були проведені дослідження щодо вимірювання та моніторингу динамічних пошкоджень конструкцій за допомогою датчиків FBG. У цьому дослідженні була запропонована система вимірювання напружень за допомогою датчиків FBG, що встановлені на складній металевій конструкції (рис. 17). Такий тип конструкції широко використовується в машинобудівній, будівельній, транспортній галузях тощо. Датчики FBG розміщені на найбільш вразливих місцях - зварних металевих з'єднаннях та зварних з'єднаннях з ребрами конструкції. Складові напружень, спричинені динамічними навантаженнями та зміною температури, отримуємо за допомогою аналізу напружень багатороздільної здатності. Крім того, множинна статистична характеристика спектру напружень моделюється за допомогою методу імовірнісного розподілу та запропонованого підходу до оцінки параметрів, заснованих на так званому генетичному алгоритмі. Оптимальний розподіл досягається Байєсівським інформаційним критерієм. Крім того, напруження зварного з'єднання обчислюється методом екстраполяції, а також з врахуванням стохастичної природи коефіцієнта концентрації напруження.

Довжина хвилі Брега $\Delta\lambda_B$ визначатимемо на основі рівняння:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \{(\alpha + \xi) \Delta T + (1 - p_e) \Delta \varepsilon\}, \quad (29)$$

де $\Delta\varepsilon$ - зміна деформації, ΔT - зміна температури, α - коефіцієнт теплового розширення, ζ - термооптичний коефіцієнт, p_e - деформаційно-оптичний коефіцієнт.

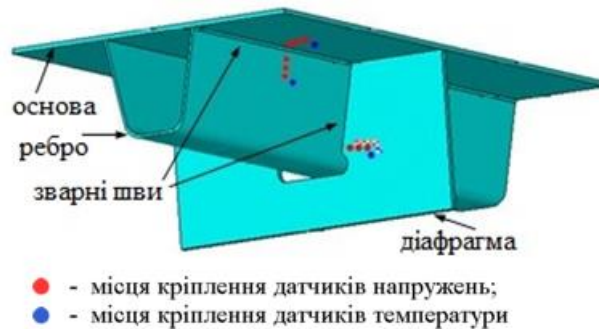


Рисунок 17 – Схема розміщення датчиків FBG для вимірювання напружень на складній металевій конструкції

У відповідності до отриманих значень показів датчиків та зміни довжини хвилі Брега за допомогою вимірювального модуля приладової системи отримано динаміку зміни температури (рис. 18, а) та зміни деформації (рис. 18, б). З графіків рис. 18 видно, що тенденція зміни напруження є досить схожою з температурою. Отже, можна зробити висновок, що викликане температурою напруження займає значну частку загального напруження. Діапазони напружень зварного з'єднання досліджуваної конструкції коливаються в межах 5 МПа, які, в основному, спричинені динамічними навантаженнями навколишнього середовища.

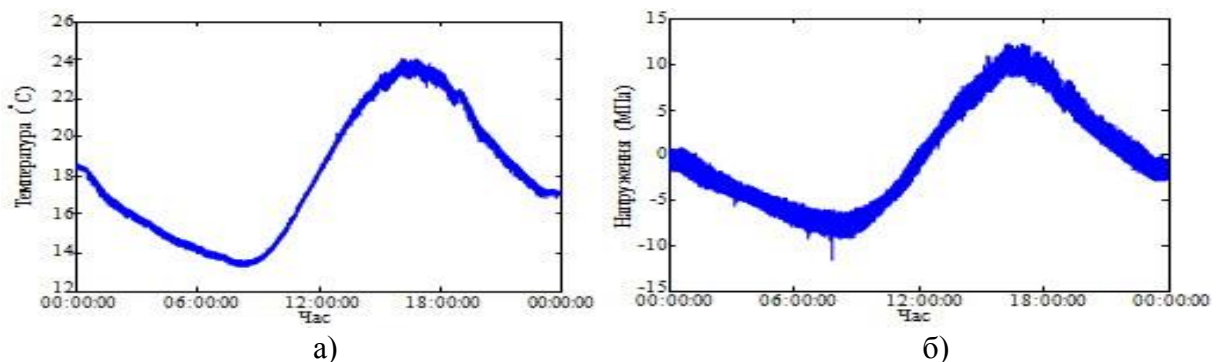


Рисунок 18 – Графіки зміни температури (а) та напруження (б) у часі для досліджуваної конструкції у ненавантаженому стані

Під час динамічних навантажень тенденція зміни також досить схожа на температуру поверхні, як показано на рис. 19. Спектр напружень для періоду імітації експлуатаційних динамічних навантажень демонструє мультимодальну характеристику і містить компоненти напруження, що індукуються динамічними навантаженнями навколишнього середовища та експлуатаційними динамічними навантаженнями.

Для розкладу необроблених даних на високочастотні та низькочастотні компоненти було застосовано Wavelet-аналіз багатороздільної здатності. Wavelet-аналіз мультимодальної здатності дозволяє розкласти сигнал на різні шкали роздільної здатності: дані з грубою роздільною здатністю містять інформацію про низькочастотні компоненти, а дані з більш чутливою

роздільною здатністю містять інформацію про високочастотні компоненти. Отримані й оброблені деформаційні сигнали були розкладені на високочастотні та низькочастотні компоненти на різних рівнях. Для кожного рівня високочастотна частина компоненти відокремлюється, а решта низькочастотної частини компоненти (апроксимації) переноситься на наступний рівень декомпозиції. Завдяки Wavelet-аналізу з роздільною здатністю, деформаційний компонент, який можна віднести до температурного впливу, може бути отриманий з частини найнижчої частоти в області перетворення Wavelet.

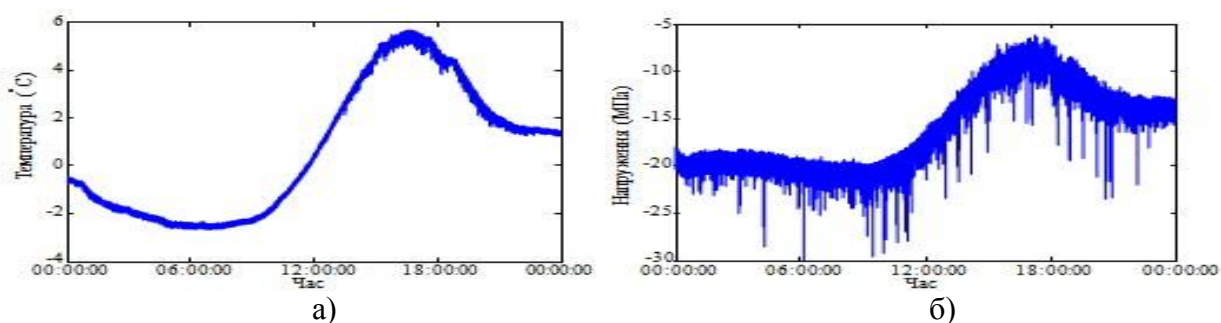


Рисунок 19 – Графіки зміни температури (а) та напруження (б) у часі для досліджуваної конструкції у навантаженому стані

Спектр напружень представляє мультимодальну характеристику, а його функція щільності розподілу імовірностей може бути виражена у вигляді зваженої суми різних функцій щільності розподілу імовірностей. Модель кінцевої функції розподілу імовірностей є комбінацією двох або більше щільностей розподілу імовірностей. На основі обмеженого набору щільності розподілу імовірностей $f(x)$, $f_2(x)$, ..., $f_n(x)$ і відповідних величин ваги w_1 , w_2 , ..., w_n , структура функції кінцевого розподілу імовірностей визначається за формулою:

$$f(x|n, w, \theta) = \sum_{l=1}^n w_l f_l(x|\theta_l), \quad (30)$$

де $f(x|n, w, \theta)$ - цільова щільність розподілу імовірностей; $f_l(x|\theta_l)$ - задана параметрична функція інтелектуальних компонентів щільності розподілу імовірностей. Орієнтовні параметри моделювання щільності розподілу імовірностей для спектру напружень включають кількість компонентів або груп n , вагу компонентів щільності розподілу імовірностей w_l та параметри кожного компонента θ_l .

У цьому дослідженні розглядається три основні функції щільності розподілу імовірностей як прогнозовані кінцеві функції розподілу, а саме функції: нормального розподілу, логнормального розподілу та розподілу Вейбулла. Ці розподіли можна виразити наступним чином:

- функція нормального розподілу:

$$f(x|c, w, \theta) = \sum_{l=1}^c w_l \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{(x - \mu_l)^2}{\sigma_l^2} \right\}, \quad (31)$$

- функція логнормального розподілу:

$$f(x|c, w, \theta) = \sum_{l=1}^c w_l \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_l x} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{(\ln(x) - \mu_l)^2}{\sigma_l^2}\right\}, \quad (32)$$

- функція розподілу Вейбулла:

$$f(x|c, w, \theta) = \sum_{l=1}^c w_l \frac{\gamma_l}{\eta_l} \left(\frac{x}{\eta_l}\right)^{\gamma_l-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\eta_l}\right)^{\gamma_l}\right\}, \quad (33)$$

де μ_l та σ_l - параметри середніх значень та стандартних відхилень у нормальних та логнормальних розподілах; γ_l і η_l - параметр форми та параметр масштабу розподілу Вейбулла.

Невідомі параметри в моделях щільності розподілу імовірностей визначатимуться запропонованим методом оцінки параметрів на основі генетичного алгоритму.

Встановлення найбільш оптимальної функції T є найважливішою частиною генетичного алгоритму. Якщо припустити, що ми маємо дані $x=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$, очевидно, що чим ближче між моделлю та вимірюваним розподілом даних, тим більше значення функції максимальної імовірності. Таким чином, наступне рівняння використовується як умова для оптимальної функції:

$$T=f(x|\theta)=f(x_1|\theta) \times f(x_2|\theta) \times \dots \times f(x_n|\theta), \quad (34)$$

Щоб врахувати, чи відповідають спектри напружень вибраним моделям статистичного розподілу, дані моделі розподілу з різними компонентами необхідно порівнювати та вибирати, виходячи з відповідних показників. Тому у даному дослідженні було застосовано Байєсівський критерій інформації, що використовується для визначення кількості компонентів та вибору оптимальної моделі спектру напружень.

Байєсівський критерій інформації визначається виразом:

$$BKI = \ln(n)k - 2\ln(L), \quad (35)$$

де L - максимальне значення функції ймовірності для моделей; k - відхилення, яке є кількісною оцінкою параметрів у моделі; n - кількість точок даних у x .

Переважатиме та модель, у якої значенням Байєсівський критерій інформації буде найнижчим. Для проведення аналізу імовірнісного моделювання використано дані показів датчиків напружень FBG.

Для моделювання кінцевої функції щільності розподілу імовірностей та кумулятивної щільності розподілу для даних діапазону напружень використовуються три види кінцевих функцій щільності розподілу імовірностей (нормальна, логнормальна та Вейбулла). Відповідні розрахункові параметри різних моделей розподілу кінцевих функцій обчислено запропонованим методом оцінки параметрів на основі генетичного алгоритму. Оптимальну модель вибрано відповідно до значень Байєсівського критерію інформації.

На рис. 20 показано динаміку значень Байєсівського критерію інформації з різною кількістю компонентів для трьох моделей щільності розподілу імовірностей.

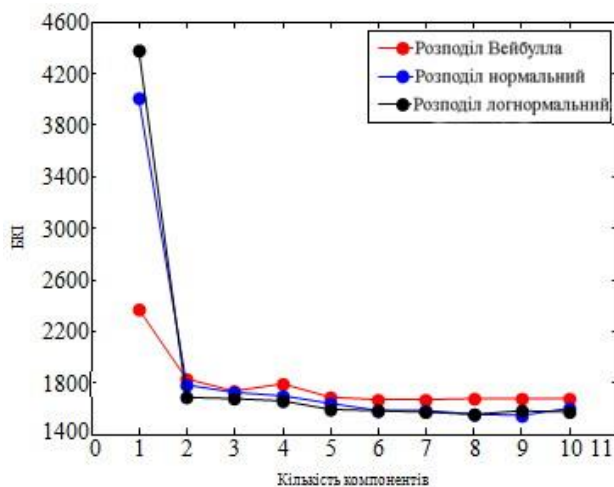


Рисунок 20 – Графік залежностей Байєсівського критерію інформації від кількості компонентів

Серед трьох розподілів нормальний розподіл призводить до найнижчого значення Байєсівського критерію інформації, тому раціонально вибирати нормальний розподіл функції з дев'ятьма компонентами як оптимальний розподіл імовірності діапазону напружень.

У **шостому розділі** здійснено обробку результатів вимірювання механічних величин, а саме напруження та деформації запропонованою інтелектуальною приладовою системою в умовах невизначеності, розглянуто методи покращення метрологічних характеристик запропонованої приладової системи та підвищення її продуктивності.

Встановлено, що невизначеність характеризує розсіювання значень вимірюваної величини, де параметром розсіювання є середнє квадратичне відхилення чи половина ширини інтервалу розсіювання з установленим рівнем довіри. Тоді рівень довіри в цьому випадку буде дорівнювати одиниці.

Досліджено, що невизначеність результату вимірювання включає багато компонентів, деякі з них можна охарактеризувати середнє квадратичне відхилення, отриманим на основі статистичного розподілу результату вимірювань. Решту компонентів можна також охарактеризувати середнеквадратичним відхиленням, але отриманим на основі суб'єктивно визначеного розподілу ймовірностей чи за допомогою іншої інформації.

Доведено, що результат вимірювання є найкращою оцінкою значення вимірюваної величини коли всі складові невизначеності, що виникають у результаті систематичних ефектів, вилучено, наприклад, за допомогою корекції, введення поправки і використання еталонів; невилучені залишки входять до розсіювання результатів вимірювання, і тобто до невизначеності.

Оцінено стандартну невизначеність типів А та В.

Розширену невизначеність визначають за наступною формулою:

$$U = k \cdot u_c, \quad (36)$$

де k – коефіцієнт охоплення, який залежить від заданого рівня довіри $P(\partial)$ і ефективного числа ступенів волі. Для рівня довіри $P(\partial) = 0,95$ за нормального закону розподілу ймовірностей коефіцієнт охоплення $k = 1,96$, за рівномірного закону розподілу – $k = 1,65$

Проаналізовано часові показники, які наведені для двох типів сигналів – ступінчатого та трикутного (рис.21). Як видно з даного рисунка, в першому випадку тривалість перехідного процесу скорочується в 1,71-1,78 разів. Оцінка часу виходу на синхронну швидкість при трикутному впливові дає більший вигравш на середніх частотах – приблизно у 2,1 рази, і менший на високих – до 1,32 разів, оскільки абсолютний рівень зони контролю сигналу похибки у 1,83% був фіксованим на всіх частотах. Дещо коротшою стає початкова ділянка ступінчатого перехідного процесу, що пояснюється відповідним незначним розширенням смуги частот пропонованої системи. Це є поясненням причин невеликого зменшення середнього квадратичного відхилення у даному випадку (в 1,11-1,14 разів), адже внесок початкової ділянки з великою амплітудою в результат обчислення середнього квадратичного відхилення є найбільш вагомим завдяки високому значенню коефіцієнта форми такого сигналу, незважаючи на практичну відсутність ефекту перерегулювання. А от зменшення СМВ у 1,64-1,77 разів є цілком обґрунтованим саме завдяки подоланню останнього.

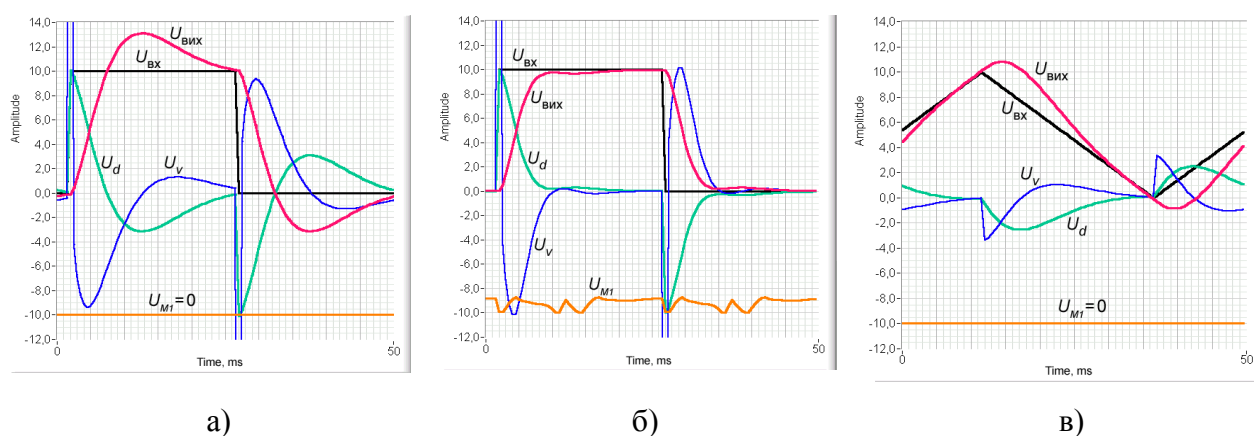


Рисунок 21 - Експериментальне визначення кількісних показників динамічних характеристик досліджуваної приладової системи:
а), б)- ступінчатий сигнал; в)- трикутний сигнал

Для вимірювальних сигналів наведено амплітудні дані про рівень динамічної похибки приладової системи. Показано, що задовільні результати отримані для трикутного впливу: у всьому частотному діапазоні середнього квадратичного відхилення зменшується у 1,8-2 рази, СМВ – у 2,1-2,4 рази. У випадку синусоїдного сигналу показники ефективності нового методу досягають однакових значень для СКВ і СМВ у 2,35-2,9 разів, що пояснюється гармонійною формою сигналу і лінійністю процесів, що відбуваються в системі.

Одержані результати дослідження знайшли подальше використання у розробці нових типів приладів та методів для вимірювання механічних величин, а саме: переміщень, деформації, напруження, тиску та сили.

Одержані експериментальні дані підтвердили достовірність розробленої теорії розробки приладової системи та принципів її побудови.

В **загальних висновках** підсумовано основні результати досліджень, проведених у дисертаційній роботі, як теоретичних, так і експериментальних, отриманих в лабораторних умовах.

ВИСНОВКИ ТА ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У роботі вирішено важливу науково–прикладну проблему - розроблення науково – обґрунтованих методів та засобів вимірювання напружено-деформованого стану складних конструкцій, що досягається завдяки застосуванню системного підходу до розробки приладової системи вимірювання параметрів напружено – деформованого стану, що базується на інтелектуальному аналоговому інтерфейсі, а також удосконалення існуючих засобів та методів вимірювання деформації. Основними перевагами цих методів є високі точність вимірювання, швидкодія та завадозахищеність.

На основі виконаних досліджень отримані такі наукові та практичні результати:

1. Здійснено аналіз сучасного стану розвитку методів і засобів вимірювання напружено – деформованого стану, на основі якого розроблено нову класифікацію методів вимірювання напружено – деформованого стану та класифікацію факторів, що впливають на вимірювання напружено – деформованого стану.

2. Досліджено та ідентифіковано параметри математичних моделей вимірювання напружено– деформованого стану складних конструкцій, що дало можливість удосконалити математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено– деформованого стану та розробити методику вимірювання деформацій та напружень з урахуванням структури сенсорного елемента датчика та температурного коефіцієнту опору тензорезисторів, що дає змогу здійснити ефективну лінеаризацію та корекцію, та забезпечує підвищення точності вимірювання деформацій та напружень.

3. Розроблено теоретичні основи побудови приладової системи для вимірювання напружено– деформованого стану складних конструкцій на основі системного підходу та синтезу вимірювальної інформації про напружено– деформований стан складних конструкцій, що дають можливість визначити коригуючі параметри при використанні поліноміальних залежностей від п'ятого до дев'ятого порядку.

4. Запропоновано нова технологію побудови приладів для вимірювання механічних величин роботи з інтелектуальними датчиками на базі TEDS, яка дає змогу підвищити метрологічні характеристики приладової системи в порівнянні з існуючими та розроблено метод оцінювання динамічних невизначеностей, який полягає у визначенні амплітудного значення

динамічної невизначеності на основі сукупності амплітудо – частотної та фазо– частотної характеристики розробленого засобу вимірювання напруження та спектральної щільності сигналу, що дає змогу підвищити точність вимірювання.

5. Удосконалено методологію розв’язання проблеми підвищення точності вимірювання параметрів напружено– деформованого стану приладовою системою з покращеними метрологічними характеристиками, а саме підвищенням точності вимірювання, швидкодії та завадозахищеності на основі статистичних даних на основі методу автоматичної безрозривної корекції систематичної складової похибки дистанційного вимірювання напружено – деформованого стану на базі аналогових інтерфейсів для тензодатчиків, який, на відміну від існуючих, дозволяє більш ефективно коригувати похибки вимірювального каналу та розроблено метод корекції інструментальної випадкової похибки, зумовленої неідеальністю активних компонентів, опору ліній зв’язку та аналогових комутаторів при дистанційному вимірюванні тензодатчиком на основі математичних моделей метрологічних характеристик, які являють собою низькочастотні корельовані шуми.

6. Удосконалено математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій та розроблено методику вимірювання деформацій та напружень з урахуванням структури сенсорного елемента датчика та температурного коефіцієнту опору тензорезисторів, що дає змогу здійснити ефективну лінеаризацію та корекцію, та забезпечує підвищення точності вимірювання деформацій та напружень.

7. Удосконалено модель аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань сигналів тензодатчиків з автоматичною корекцією похибки під впливом різноманітних дестабілізуючих факторів, зорієнтований на дистанційне вимірювання параметрів напружено – деформованого стану за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків з підвищеними метрологічними та техніко – економічними характеристиками, структура яких включає вимірювальний підсилювач з диференційно- струмовими входами, що забезпечує підвищення коефіцієнту послаблення синфазних завад.

8. Набув подальшого розвитку метод і удосконалені засоби захисту вимірювального каналу параметрів напружено – деформованого стану від завад нормального виду, у тому числі за умови не лінійності функції перетворення аналогового інтерфейсу, котрий, на відміну від існуючих методів, забезпечує підвищення точності вимірювань та покращення завадозахищеності аналогового інтерфейсу в умовах апроксимації нелінійних функцій перетворення вимірювальних сигналів.

9. Удосконалено математичну модель на базі вимірювального підсилювача з диференціальними – струмовими входами для роботи з одноелементним тензодатчиком, де один із подільників утворений резистивним

тензодатчиком, а сам вимірювальний підсилювач включає операційний підсилювач першого каскаду, виконаний за схемою інвертора струму, що дає можливість зменшити інструментальні похибки, зумовлені неідеальністю операційних підсилювачів, ліній зв'язку та аналогових комутаторів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Кузьмич Л.В. Методи та засоби автоматичного контролю та вимірювання параметрів напружено – деформованого стану складних конструкцій. [Текст] / Л.В. Кузьмич, В.П. Квасніков. – Київ : Інтерсервіс, 2019. – 147с. – ISBN 978-617-696-830-6.

Здобувачем підготовлено Розділи 3 та 4.

Статті у фахових виданнях, які включені до міжнародних науково-метричних баз даних:

2. L.Kuzmych. Study of the durability of reinforced concrete structures of engineering buildings [Text] / L.Kuzmych, V.Kvasnikov // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 543, 2017, pp. 659-663, ISSN 2194-5357, DOI 10.1007/978-3-319-48923-0 (*Scopus*)

Здобувачем запропоновано методику аналізу засобів вимірювання міцності та надійності складних технічних конструкцій, зокрема залізобетонних.

3. V.Babich. Estimation of flexures of the reinforced concrete elements according to the National Ukrainian & European standards [Text] / V.Babich, V.Dovbenko, L.Kuzmych, T.Dovbenko // *MATEC Web of Conferences*. Vol. 116, 02005 (2017), DOI: 10.1051/matecconf/201711602005 (*Scopus*)

Здобувачем запропоновано методику оцінки вимірювання напружено – деформованого стану елементів складних технічних конструкцій у з врахуванням міжнародних стандартів.

4. L. Kuzmych. Current state of tools and methods of control of deformations and mechanical stresses of complex technical systems [Text] / L. Kuzmych; O. Kobylanskyi; M. Duk. // *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, Vol.10808, 2018, 108085J; doi:10.1117/12.2501661 (*Scopus*)

Здобувачем здійснено оцінку сучасного стану засобів та методів контролю та вимірювання деформацій та напружень в складних системах.

5. Кузьмич Л.В. Підвищення експлуатаційної надійності гирлових споруд [Текст] / Л.В. Кузьмич // *Меліорація і водне господарство*. – 2010. – Вип. №98. – С. 345– 350. (*Google Scholar, Crossref, Researchbib, Scientific Indexing Services, Elibrary, Ring*)

6. Кузьмич Л.В. Експлуатаційні вимоги до забезпечення надійності осушувальних гідромеліоративних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // *Вісник інженерної академії України*. – 2010. – Вип. №3-4. – С. 141 – 144. (*Google Scholar*)

7. Кузьмич Л.В. Оцінка надійності осушувальних систем на прикладі «Головинської» осушувальної системи, яка знаходиться в Рівненській області Костопільському району [Текст] / Л.В. Кузьмич // *Вісник національного університету водного господарства та природокористування: Збірник наукових праць*. – 2013. – Вип. №4(64). – С. 78– 84. (*Google Scholar*)

8. Кузьмич Л.В. Оцінка технічного стану елементів осушувальної системи «Марининська» Березнівського району Рівненської області / Л.В. Кузьмич, Ю.В. Шекель // Вісник національного університету водного господарства та природокористування: Збірник наукових праць. – 2014. – Вип. №4(68). – С. 34–42. (*Google Scholar*)

Здобувачем запропоновано метод оцінки технічного стану елементів складних конструкцій на основі теорії надійності з застосуванням системного підходу

9. Кузьмич Л.В. Сучасні тенденції приладових систем вимірювання механічних величин [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2016. – Вип. №2. – С. 180 – 183. DOI: 10.25140/2411-5363-2018-4(14)-28-33 (*Google Scholar*)

10. Кузьмич Л.В. Сучасні тенденції створення приладових систем вимірювання механічних величин [Текст] / Л.В. Кузьмич // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2016. – Вип. №1(8). – С. 95 – 99. (*Google Scholar*)

11. Кузьмич Л.В. Аналіз напружено – деформованого стану складних конструкцій в штатних і аварійних ситуаціях. [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. №3. – С. 154 – 157. (*Google Scholar*)

12. Кузьмич Л.В. Методи обґрунтування структурно-функціонального аналізу та принципи побудови системи діагностування напружено - деформованого стану складних конструкцій [Текст] / Л.В. Кузьмич // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2017. – Вип. №2(11). – С. 85 – 89. (*Google Scholar*)

13. Кузьмич Л.В. Аналіз наявних методів та засобів вимірювання механічних напружень складних технічних систем на прикладі гідротехнічних споруд [Текст] / Л.В. Кузьмич // Метрологія та прилади. – 2017. – Вип. №5-1(67). – С.89-93. (*Index Copernicus, Google Scholar*)

14. Кузьмич Л.В. Оцінка залишкового ресурсу складних технічних конструкцій в умовах малоциклової та багатоциклової втоми [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць. – 2018. – Вип. №1(81). – С. 205 – 211. <https://doi.org/10.31713/vt1201822> (*Google Scholar*)

Здобувачем визначено задачі, які необхідно вирішувати при оцінці залишкового ресурсу з врахуванням невизначеності

15. Кузьмич Л.В. Аналіз напружено – деформованого стану складних конструкцій в аварійних ситуаціях [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2018. – Вип. №2. – С. 61 – 64. (*Google Scholar*)

16. Кузьмич Л.В. Методика оцінювання ресурсу складних технічних об'єктів [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць. – 2018. – Вип. №2(82). – С. 240– 248. (*Google Scholar*)

Здобувачем запропоновано математичну модель системи оцінки фактичного стану технічної конструкції з врахуванням динаміки зміни вимірювальних механічних величин

17. Кузьмич Л.В. Сценарії виникнення та розвитку небезпечних станів

складних технічних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2018. – Вип. №62. – С. 35 – 40. (*Google Scholar*)

18. Кузьмич Л.В. Підходи щодо оцінювання ресурсу технічних об'єктів та систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. №2(82). – С. 204 – 207. DOI:[https://doi.org/10.26642/tn-2018-2\(82\)-204-207](https://doi.org/10.26642/tn-2018-2(82)-204-207) (*Index Copernicus, Google Scholar, DOAJ*)

19. Кузьмич Л.В. Аналіз вичерпування ресурсу складних потенційно небезпечних інженерних конструкцій [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2018. – Вип. №3. – С. 184 – 187. (*Google Scholar*)

20. Кузьмич Л.В. Комплексний аналіз динаміки навантаження та напружено – деформованих станів складних технічних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2018. – Вип. №4. – С. 47 – 50. (*Google Scholar*)

21. Орнатський Д.П. Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків [Текст] / Д.П.Орнатський, Л.В.Кузьмич, В.П.Квасніков. // Метрологія та прилади. – 2018. – Вип. №6(74). – С. 9 – 12. (*Index Copernicus, Google Scholar*)

Здобувачем здійснено аналіз існуючих аналогових інтерфейсів та запропоновано удосконалену модель аналогового інтерфейсу на базі мультиплексора та резистивного тензодатчика

22. Кузьмич Л.В.Механічні впливи на надійність складних технічних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Технічні науки та технології. – 2018. – Вип. №4(14). – С. 28 – 33. DOI: 10.25140/2411-5363-2018-4(14)-28-33 (*Index Copernicus, Uran, ResearchBib, Base, WorldCat, ПИНЦ, Crossref*)

23. Орнатський Д.П. Моделювання аналогового інтерфейсу для багатоканальних дистанційних вимірювань з резистивними тензодатчиками [Текст] / Д.П.Орнатський,Л.В.Кузьмич, В.П.Квасніков. // Метрологія та прилади. . – 2019. – Вип. №1(75). – С. 31 – 36. (*Index Copernicus, Google Scholar*)

Здобувачем розроблено математичну модель, що описує робочий цикл вимірювання вихідних напруг операційних підсилювачів та запропоновано рівняння, що описує скорегований результат вимірювання

24. Кузьмич Л.В. Розробка способу та засобу вимірювань напружено – деформованого стану за допомогою тензодатчика [Текст] / Л.В. Кузьмич, Д.П. Орнатський, В.П. Квасніков // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – Вип. №1. – С. 69 – 74. (*Index Copernicus, Crossref, CiteFactor, ResearchBib, Google Scholar, UlrichsWeb, WorldCat*)

Здобувачем здійснено аналіз дестабілізуючих факторів, що обмежують точність вимірювання тензодатчиком, визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого поліному

25. Кузьмич Л.В. Обробка результатів вимірювання механічних величин інтелектуальними приладовими системами (в умовах невизначеності) [Текст] / Л.В. Кузьмич//Вісник Інженерної академії України.– 2019.–Вип. №.2 – С. 44–51. (*Google Scholar*)

26. Кузьмич Л.В. Синтез методу вимірювання напружено – деформованого стану складних конструкцій [Текст] / Л.В.Кузьмич // Метрологія та прилади. – 2019. – Вип. №3(77). – С. 12 – 18. (*Index Copernicus, Google Scholar*)

27. Кузьмич Л.В. Оптимізація вимірювальних засобів напружено – деформованого стану за допомогою тензодатчиків [Текст] / Л.В. Кузьмич, Д.П. Орнатський, В.П. Квасніков // Авиационно- космическая техника и технология. – 2019. – Вип. №3(155). – С. 50 – 57. (*Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, eLIBRARY.RU, CiteFactor, Academic Keys, Infobase Index, Google Scholar*)

Здобувачем розроблено принципи побудови, проектування та математичного моделювання вимірювання деформацій і напружень приладовою системою

28. Кузьмич Л.В. Оптимізація роботи приладової системи вимірювання напружено – деформованого стану складних технічних об'єктів та систем [Текст] / Л.В.Кузьмич // Механіка гіроскопічних систем. – 2019. – Вип. №. 37– С. 112 – 120. (*Index Copernicus, International*)

Статті у інших виданнях:

29. Гурин В.А. Аналіз надійності елементів гідромеліоративних систем [Текст] / В.А. Гурин, Л.В. Кузьмич // Вісник національного університету водного господарства та природокористування: Збірник наукових праць. – 2008. – Вип. №4(44). – С. 341– 347.

Здобувачем запропоновано метод аналізу надійності елементів складних конструкцій на основі теорії надійності

30. Кузьмич Л.В. Вимірювання механічних величин при обліку водної та теплової енергії [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вимірювальна та обчислювальна техніка і технологічних процесах. – 2016. – Вип. №3(56). – С. 56 – 59.

31. Кузьмич Л.В. Сучасні вимоги енергозберігаючої політики щодо механічних вимірювань витрат води та теплової енергії [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць. – 2016. – Вип. №2(74). –С. 9–13.

Здобувачем здійснено аналіз механічних вимірювань водної та теплової енергії в Україні

Патенти на корисну модель

32. Патент №134572 (Україна), МПК G01R 21/00. Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків [Текст] / В.П.Квасніков, Л.В.Кузьмич, Д.П.Орнатський. – Реєстрац. номер заявки U 201812440. Опубліковано в бюлетені №10 від 27.05.2019.

Здобувачем здійснено аналіз прототипів та запропоновано удосконалену модель аналогового інтерфейсу на базі мультиплексора та резистивного тензодатчика

Тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій

33. Анализ надежности элементов гидромелиоративных систем и их усовершенствование [Текст] / В.А. Гурин, Л.В. Кузьмич // Материалы международной научно – практической конференции «Социально – экономические и экологические проблемы сельского и водного хозяйства». — М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2010. — С.204-211.

34. Кузьмич Л.В. Організаційно – технічні заходи підтримання в справному стані гідромеліоративних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич // Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції – Випуск 9. - Херсон: РВВ "КОЛОС", 2015. – С. 120.

35. L.Kuzmych. Measurement of mechanical quantities of water flows in the space heating regardless of the type of heat pipelines of engineering systems [Текст] / L.Kuzmych, A.Kuzmych // Інформаційно – обчислювальні технології, автоматика та електротехніка. Міжнародна науково – практична конференція молодих науковців, аспірантів та студентів (ІТАЕ – 2016) 10-11 листопада 2016 року. Матеріали конференції. Рівне, НУВГП, 2016. . – С.282-283.

36. Кузьмич Л.В. Сучасний стан механічних вимірювань витрат води та теплової енергії [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2016). Дев'ята міжнародна науково – практична конференція 17-18 травня 2016 року, Київ, Україна. – К.: НАУ, 2016. – С.139-140.

37. Кузьмич Л.В. Проблеми комерційного обліку енергоресурсів України (на прикладі вимірювання механічних величин в обліку водної та теплової енергії) [Текст] / Л.В. Кузьмич, В.П.Квасніков, Я.С.Довженко // X міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія – 2016)», Харків . – С. 101.

38. L.Kuzmych. Features of measuring the amount of energy of water-heat [Текст] / L.Kuzmych,. M.Kataeva // Proceedings the deventh world congress “Aviation in the XXI-st century” Safety in aviation and dpace technologies”, September 19-21, 2016, KYIV, UKRAINE. – К., 2016. – С.371 – 374.

39. Кузьмич Л.В. Аналіз сучасних інтелектуальних систем вимірювання механічних величин водних ресурсів України [Електронний ресурс] / Л.В. Кузьмич, В.Г. Павлюк // Матеріали III Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 23 листопада 2016 р. – К: НУХТ, 2016. — Режим доступу: <http://nuft.edu.u8a/page/view/konferentsii>

40. Кузьмич Л.В. Сучасний стан засобів та методів контролю деформацій та механічних напружень складних технічних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Четверта міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2017), 31 жовтня – 2 листопада, 2017р. Збірник тез доповідей. – Вінниця: ПП «ТД»Едельвейс І К», 2017. – С.106.

41. Кузьмич Л.В. Оцінювання результатів вимірювання механічних величин в умовах невизначеності [Текст] / Л.В. Кузьмич // Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», Том 2, 24-27 квітня 2017 р., м.Чернігів.– С.147.

42. Федоров І.Б. Оцінювання вимірювання інтелектуальними приладовими системами в умовах невизначеності [Текст] / І.Б. Федоров, Л.В. Кузьмич // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2017). Десята міжнародна науково – практична конференція 16-17 травня 2017 року, Київ, Україна. – К.: НАУ, 2017. – С.115-117.

43. Кузьмич Л.В. Сучасний стан вимірювання механічних деформацій складних технічних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич, Ю.С. Цехмейструк. // Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції “ABIA-2017”, 19-21 квітня 2017р., Київ, 2017. – С.268-272.

44. Кузьмич Л.В. Аналіз сучасних засобів та методів вимірювання деформацій і напруження для контролю міцності конструкцій гідротехнічних споруд [Текст] / Л.В. Кузьмич // Збірка матеріалів міжнародної науково-практичної конференції. – Херсон, Україна: Вид-во ПП «ЛТ - Офіс», 2017.- С.146-149.

45. Кузьмич Л.В. Обґрунтування залишкового ресурсу складних технічних конструкцій в умовах тривалої експлуатації [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич. // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2018). XI міжнародна науково – практична конференція 22-23 травня 2018 року, Київ, Україна. – К.: НАУ, 2018. – С.133-135.

46. Кузьмич Л.В. Підвищення надійності, покращення методів та засобів контролю напружено – деформованого стану металевих конструкцій гідротехнічних споруд [Електронний ресурс] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич. // Матеріали IV міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 22 листопада 2017 р.– К: НУХТ, 2017. – С.140-141 — Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>

47. Кузьмич Л.В. Магнітопружна пам'ять магнетиків та її використання для вимірювання силового впливу на сталеві деталі складних конструкцій [Текст] / Л.В. Кузьмич // Удосконалення та модернізація озброєння, військової та спеціальної техніки, що знаходиться на озброєнні збройних сил України, шляхом впровадження технічних рішень, що охороняються патентами України на винахід та корисну модель. Матеріали науково-практичної конференції 30 листопада 2017р, Київ. — С.42-43.

48. Кузьмич Л.В. Непараметрична ідентифікація щільності розподілу вірогідності в складній постійно змінній завадовій обстановці [Текст] / Л.В. Кузьмич // Наукове видання VIII міжнародної науково-практичної конференції комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем 10 - 12 травня 2018 р., том 2, м. Чернігів, ЧНТУ. — С.178.

49. Кузьмич А.А. Принципи побудови системи діагностування напружено-деформованого стану складних конструкцій [Текст] / А.А. Кузьмич, Л.В. Кузьмич // Сучасні проблеми математичного моделювання, обчислювальних методів та інформаційних технологій: матеріали міжнародної наукової конференції. – Рівне, 2018. – С.199-200.

50. Кузьмич Л.В. Довговічність складних технічних конструкцій при багатоцикловій та малоцикловій втомі [Текст] / Л.В. Кузьмич, В.П. Квасніков, Ю.М. Сковородкіна // XI Міжнародна науково – технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка» 9–11 жовтня 2018 року. Тези доповідей. Харків, 2018. – С.97.

51. L.V.Kuzmych. The methods of functional analysis and the principles of diagnostic of stress-deformed condition of construction structures [Текст] / L. V.

Kuzmich // VIII Всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології», Київ, 2018. – С.2.4.1-2.4.4.

52. Кузьмич Л.В. Моделирование аналогового интерфейса для дистанционных измерений [Електронний ресурс] / Л.В. Кузьмич, Д.П.Орнатський, В.П.Квасников // Информационные технологии в образовании, науке и производстве : VI международная научно-техническая интернет-конференция, 17-18 ноября 2018 г. — Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/49933>

53. L.V.Kuzmich. The estimation of the parameters of the stress - strain state of complex technical constructions [Текст] / L.V.Kuzmich // Proceedings the Fourteenth International Scientific Conference. “AVIA-2019”, April 23-25, 2019. Kyiv. — P.4.27 - 4.29.

54. Кузьмич Л.В. Оптимізація роботи модуля приладової системи вимірювання напружено – деформованого стану складних технічних об'єктів та систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // XII міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки»: Збірка доповідей. К.:НТУУ «КПІ імені І. Сікорського», 2019.— С.95 - 102.

55. Кузьмич Л.В. Теоретичні основи побудови приладової системи вимірювання напружено – деформованого стану складних конструкцій [Текст] / Л.В. Кузьмич, П.Л. Ігнатенко // Наукове видання IX міжнародної науково-практичної конференції комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем 14 - 16 травня 2019 р. м. Чернігів том 2, ЧНТУ. — С.230 - 231.

56. L.V.Kuzmich. Development of the intelligent instrument system for monitoring the parameters of the stress - strain state of complex structures [Текст] / L. V. Kuzmich // Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2019: тези доповідей Чотирнадцятої міжнародної науково – практичної конференції (Чернігів, 24-26 червня 2019 р.). – Чернігів: ЧНТУ. — С.79-82.

АНОТАЦІЯ

Кузьмич Л.В. Методи та засоби вимірювання напружень та деформацій складних конструкцій приладовою системою. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2019.

У дисертаційній роботі вперше запропоновано нову технологію побудови приладів для вимірювання механічних величин інтелектуальними датчиками на базі TEDS, яка дає змогу підвищити метрологічні характеристики приладової системи. Розроблено метод автоматичної безрозривної корекції систематичної складової похибки дистанційного вимірювання напружено–деформованого стану на базі аналогових інтерфейсів для тензодатчиків. Дістали подальший розвиток теоретичні основи аналізу приладової системи на основі системного підходу та синтезу вимірювальної інформації про напружено–деформований стан. Дістали

подальший розвиток теоретичні основи розробки приладових систем, у тому числі удосконалено математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено–деформованого стану. Удосконалено математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій. Удосконалено модель аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань сигналів тензодатчиків з автоматичною корекцією похибки. Набув подальшого розвитку метод і удосконалені засоби захисту вимірювального каналу від завад нормального виду. Удосконалено математичну модель на базі вимірювального підсилювача з диференціально–струмовими входами для роботи з тензодатчиком.

Ключові слова: приладова система, первинний вимірювальний підсилювач, аналоговий інтерфейс, механічні величини, напружено – деформований стан, метрологічна надійність, тензодатчик, складові похибки, середньоквадратичне значення похибки апроксимації, функція перетворення.

АННОТАЦИЯ

Кузьмич Л.В. Методы и средства измерения напряжений и деформаций сложных конструкций приборной системой. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.01 – приборы и методы измерения механических величин. – Национальный авиационный университет, Киев. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2019.

В диссертационной работе впервые предложена новая технология построения приборов для измерения механических величин работы с интеллектуальными датчиками на базе TEDS, которая позволяет повысить метрологические характеристики приборной системы.

Впервые разработан метод автоматической безрозрывной коррекции систематической составляющей погрешности дистанционного измерения напряженно - деформированного состояния на базе аналоговых интерфейсов для тензодатчиков, который, в отличие от существующих, позволяет более эффективно корректировать погрешности измерительного канала и разработан метод коррекции инструментальной случайной погрешности.

Получили дальнейшее развитие теоретические основы анализа приборной системы на основе системного подхода и синтеза измерительной информации о напряженно - деформированное состояние сложных конструкций, дают возможность определить корректирующие параметры при использовании полиномиальных зависимостей от пятого до девятого порядка.

Получили дальнейшее развитие теоретические основы разработки приборных систем для измерения напряженно - деформированного состояния сложных технических конструкций, в том числе усовершенствована математическая модель процесса дистанционного

измерения параметров напряженно - деформированного состояния и разработана методика измерения деформаций и напряжений с учетом структуры сенсорного элемента датчика и температурного коэффициента сопротивления тензорезисторов.

Усовершенствована математическая модель процесса дистанционного измерения параметров напряженно - деформированного состояния сложных технических конструкций и разработана методика измерения деформаций и напряжений с учетом структуры сенсорного элемента датчика и температурного коэффициента сопротивления тензорезисторов.

Усовершенствована модель аналогового интерфейса для дистанционных измерений сигналов тензодатчиков с автоматической коррекции погрешности под влиянием различных дестабилизирующих факторов, ориентированный на дистанционное измерение параметров напряженно-деформированного состояния с помощью мультиплексора и резистивных тензодатчиков.

Усовершенствована математическая модель на базе измерительного усилителя с дифференциально - токовыми входами для работы с Одноэлементные тензодатчиком, где один из подельников образованный резистивным тензодатчиком, а сам измерительный усилитель включает операционный усилитель первого каскада, выполненный по схеме инвертора тока, что позволяет уменьшить инструментальные погрешности, обусловленные неидеальностью операционных усилителей, линий связи и аналоговых коммутаторов.

Ключевые слова: приборная система, первичный измерительный усилитель, аналоговый интерфейс, механические величины, напряженно - деформированное состояние, метрологическая надежность, тензодатчик, составляющие погрешности, среднее значение погрешности аппроксимации, функция преобразования.

SUMMARY

Kuzmych L.V. "Methods and means of measuring stresses and deformations of complex structures by the instrument system". - Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.11.01 "Instruments and methods for measuring mechanical quantities". - National Aviation University, Kyiv. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". - 2019.

The following new scientific results have been obtained in the dissertation. For the first time a new technology of construction of devices for measuring mechanical quantities of work with intellectual sensors on the basis of TED is proposed. For the first time, a method of automatic inseparable correction of the systematic component of the error of the remote measurement based on analog interfaces for strain gauges is developed. Theoretical foundations for the development of instrument systems of complex technical structures were further developed, including the mathematical model of the process for the remote

measurement of the parameters of the stress - strain state, and a method for measuring deformations and stresses taking into account the structure of the sensor. The mathematical model of the process of remote measurement of the parameters of stress - strain state of complex technical structures has been improved. Analog interface model for remote measurement of strain gauge signals with automatic error correction under the influence of various destabilizing factors, oriented on remote measurement of stress - strain state parameters by means of multiplexer and resistive strain gauge. The method and advanced means of protection of the measuring channel of parameters of the stress - strain state from interferences of the normal kind have been further developed. The mathematical model on the basis of the measuring amplifier with differential current inputs for work is improved.

Key words: stress - strain state, limit state, residual resource, reliability, strain gauge, temperature component of error, root mean square error of approximation, polynomial coefficient.